

CLIMA E CAMBIAMENTO CLIMATICO. II. DATI OSSERVATIVI, PALEOCLIMATOLOGIA, MODELLI CLIMATICI, ATTIVITÀ INTERNAZIONALI

CLIMATE AND CLIMATE CHANGE. II. OBSERVATIONAL DATA, PALEOCLIMATOLOGY, CLIMATIC MODELS, INTERNATIONAL ACTIVITIES

Teodoro Georgiadis¹ e Luigi Mariani^{*2}

¹ CNR IBIMET, via Gobetti, 101, 40129 Bologna BO

² Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Produzione Vegetale, Via Celoria 2, 20100 Milano MI

* Corresponding author: E-mail address luigi.mariani@unimi.it

Ricevuto 29 agosto 2005, accettato 23 marzo 2006

Riassunto

Questa review si propone di fornire una sintesi delle più recenti attività di ricerca sul tema del cambiamento climatico, tema quanto mai ampio e controverso sia per la mole di attività in corso sia per le implicazioni socio-politiche ed economiche che esso comporta. Ad un sommario profilo storico sull'argomento fa seguito un sintetico inquadramento sul sistema climatico e le sue componenti, con particolare riguardo all'importanza della circolazione atmosferica ed oceanica.

La variabilità del clima viene quindi analizzata con riferimento al ruolo delle forzanti esterne ed interne e specifici approfondimenti sono riservati al tema dei gas atmosferici, del ruolo delle nubi e degli effetti climatici dell'uso del suolo, evidenziando incertezze e lacune conoscitive attuali. Le fonti di dati (dati osservativi di superficie e da remote sensing) ed i proxy data paleoclimatici vengono analizzati in modo succinto evidenziando limiti attuali e prospettive future di tali ambiti di ricerca. Vengono poi definite le particolarità del sistema climatico che impongono severe limitazioni all'indagine fisica per mezzo di modelli matematici. Un'analisi critica circa i prodotti dei modelli climatici attualmente disponibili viene altresì condotta.

Dalla disamina effettuata emerge la necessità di garantire un giusto equilibrio fra approccio osservativo e approccio modellistico matematico, mantenendo più che mai vivo il senso critico che deve stare alla base di ogni attività di ricerca.

Parole chiave: clima, cambiamento climatico, modelli matematici, osservazioni.

Abstract

This review paper summarises recent research work on climate and climatic change, a theme wide and fuzzy due to the large variety of research activities and the social, political and economical implications.

A brief historical profile of this research field is followed by a synthetic description of the climatic system and its components, and the importance of atmospheric and oceanic circulation is particularly stressed.

Climate variability is analysed and referred to the role of external and internal forcing elements, with specific discussion carried out on the climatic effects of atmospheric gases, clouds and changes of soil use, highlighting the present uncertainties and lacks of knowledge. Data sources (observational data from surface networks of stations and remote sensing; paleoclimatic proxy data) are also shortly discussed. A description of the peculiarities of climatic system that impose severe limits to the physical research founded on mathematical models is followed by a critical analysis of climate models and by a discussion about the products of AOGCM models.

This analysis show first of all the need of a equilibrium between observational and modelling approach; the need of a critical approach to the study of climate and climatic change is also highlighted

Keywords: climate, climatic change, mathematical models, observations.

5. Dati Osservativi

La disponibilità di dati osservativi sufficientemente accurati, che offrano una copertura uniforme del pianeta e che siano prodotti con regolarità, è condizione necessaria per capire realtà e tendenze del clima alle diverse scale. Ovviamente si dovrà distinguere fra i dati prodotti da reti operative e quelli frutto di campagne di misura ad hoc, nel senso che le campagne di misura dovrebbero soprattutto servire per integrare i dati prodotti operativamente aumentando la fittezza di campionamento nello spazio e nel tempo e focalizzando l'attenzione anche su variabili non soggette a monitoraggio operativo.

I dati osservativi in meteorologia si dividono tradizionalmente in dati ottenuti da rilevamenti sensoriali (a vista) e dati prodotti da strumenti. Per quanto riguarda gli strumenti meteorologici può essere opportuno adottare una classificazione in due classi (Daley, 1993):

1. Strumenti per misure puntuali in superficie e sulla verticale. In questo caso il punto non ha la definizione matematica usuale, nel senso che si assume che lo strumento occupi il volume assai più piccolo del fenomeno campionato. Tale classe include sia gli strumenti convenzionali per misure in superficie (pluviometri, baro-

metri a mercurio, termometri, anemometri, igrometri, ecc.) sia le radiosonde per misure di temperatura, pressione, umidità, vento, ecc.

2. Strumenti che monitorano da remoto un'area della superficie terrestre o un volume dell'atmosfera. Nei sistemi attivi (radar, profiler, lidar, ecc.) gli impulsi elettromagnetici sono trasmessi attraverso l'atmosfera e il segnale riflesso o rifratto è elaborato per dar luogo ad una stima indiretta di alcune proprietà atmosferiche o superficiali (precipitazione, vapore acqueo, ecc.). In un sistema passivo le proprietà atmosferiche o superficiali sono dedotte dalla radiazione emessa, rifratta e / o riflessa nel visibile, nell'infrarosso o nella regione spettrale delle microonde.

5.1 Reti osservative per misure puntuali in superficie

Sulle reti osservative per misure puntuali in superficie pesa purtroppo ancor oggi la critica di Richardson (1922): *“Vi sono esempi di stazioni meteorologiche ... nate da un osservatorio astronomico o geofisico ovvero collocate nelle vicinanze dell'abitazione di un entusiasta che là abitava per ragioni che nulla avevano a che vedere con la meteorologia o ancora messe ai margini delle isole per “acchiappare quanto più tempo atmosferico fosse possibile” o ancora affidate alla guardia costiera perché garantiva il turno di notte o ancora messe in cima a montagne per sondare strati atmosferici più elevati. Tutte ragioni pratiche eccellenti ma che nulla hanno a che vedere con le proprietà dell'atmosfera espresse dalle equazioni della dinamica e dall'equazione di continuità...”*. Una critica tanto severa quanto inascoltata dai più e che può riassumersi nel fatto che le reti obbediscono assai spesso a criteri che poco o nulla hanno a che vedere con la fisica dei fenomeni che sono chiamate a rappresentare attraverso i dati prodotti.

Purtroppo le reti nascono e crescono spinte da svariate esigenze e poi vengono mantenute nel tempo, spesso senza considerare i cambiamenti di uso del suolo, i cambiamenti di tecnologie, di strumentazione e così via. Il tutto confluisce in un errore strumentale che può limitare in modo severo la capacità delle reti stesse di rappresentare fenomeni in atto a scala globale.

Sugli strumenti per misure puntuali in loco pesano inoltre i problemi di aliasing spaziale e temporale (Daley, 1991) che limitano la loro capacità di descrivere i fenomeni atmosferici (Mariani, 2002).

Ciò detto veniamo ad analizzare cosa indicano oggi le serie storiche secolari limitandoci al tema della temperatura dell'aria in superficie.

5.2 Remote sensing, satelliti e sondaggi

La principale limitazione nelle reti di rilevamento meteorologico della temperatura è legata al fatto che le stazioni di monitoraggio sono principalmente situate nelle vicinanze, se non all'interno, di zone antropizzate e vengono così a risentire dell'influenza delle caratteristiche delle superfici (alterazioni nell'albedo, scarsi flussi di calore latente, intrappolamento della radiazione a onda lunga uscente) e del calore prodotto dalle attività sociali e produttive umane; si tenga inoltre presente che la rete di rilevamento copre circa il 18% della superficie totale del pianeta, il che ne limita consistentemente la

rappresentatività a livello globale (per un elenco completo delle stazioni di riferimento vedere: *Climates of the World* edito dalla NOAA <http://www5.ncdc.noaa.gov/pubs/publications.html> e per lo sviluppo temporale della distribuzione: <http://lwf.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/ghcn/ghcnoverview.html#FIG3>), anche se per produrre una copertura quasi completa la rappresentatività di una singola stazione viene forzata su un areale di $5^{\circ} \times 5^{\circ}$. Da ciò deriva che gli studi sul clima e la sua variabilità impongano la necessità di trovare metodologie in grado di rilevare con un sufficiente dettaglio spazio-temporale e con sufficiente accuratezza l'andamento delle diverse variabili, in primis della temperatura intesa come indice del riscaldamento dovuto ai gas serra.

Per ottenere questo risultato l'opzione tecnologica più recente si basa sulle cosiddette metodologie a “remote sensing”, fra le quali quelle fondate sull'utilizzo dei satelliti rappresentano le più dense di prospettive.

Prima di analizzarne i risultati bisogna però subito premettere un'importante avvertenza: se da un lato queste tecniche di misura risolvono ampie scale spaziali - i satelliti possono ad esempio “vedere” tutto il globo in poche ore - dall'altro il loro recente utilizzo, inizio anni '80, ci consente di rappresentare la realtà fisica con una statistica molto più povera di dati rispetto a quella garantita dalle reti di terra. Inoltre, trovandosi il sensore nello spazio, non è spesso possibile intervenire in modo tempestivo per garantirne la calibrazione e la stessa continuità operativa. Avendo chiare in mente queste limitazioni si può cercare di mettere ordine in una vasta rassegna bibliografica inerente le misure di temperatura da remoto.

Alla fine del 1979 gli Stati Uniti tramite la NOAA misero in orbita una piccola costellazione di otto satelliti polari TIROS-N con a bordo uno strumento in grado di misurare una frequenza nelle microonde dell'ossigeno atmosferico; questo strumento prende il nome di microwave-sounding unit (MSU). Cambiamenti nell'intensità di radiazione di questa particolare frequenza possono indicare corrispondenti cambiamenti nell'energia interna della molecola di ossigeno e quindi nella temperatura dell'atmosfera.

Nel 1990 uno studio condotto da Spencer e Christy ha prodotto per la prima volta un data set globale di temperature atmosferiche, superando così prima volta i problemi posti dall'uso di dati da stazioni al suolo.

Due successivi lavori degli stessi autori, uno con l'aggiunta di Grody (Spencer *et al.*, 1990; Spencer e Christy, 1992), completavano la prima analisi dei trend atmosferici di temperatura sul periodo 1979-1990. I risultati di tale analisi riservavano una grossa sorpresa: l'andamento della temperatura su scala decadale appariva scarsamente crescente nonostante il contributo dell'aumento della temperatura stratosferica causato da alcune importanti eruzioni quali quelle del vulcano El Chichon in Messico (1982) e del Kilauea nelle Hawaii (1983). L'aumento troposferico risultava essere di 0.039 con una accuratezza di ± 0.03 K, il che significava un trend praticamente nullo nel periodo considerato a fronte di un atteso riscaldamento di 0.13 K per decade misurato dalle stazioni di terra. Nel caso della bassa troposfera il trend misurato per il periodo 1979-1994 (Christy *et al.*,

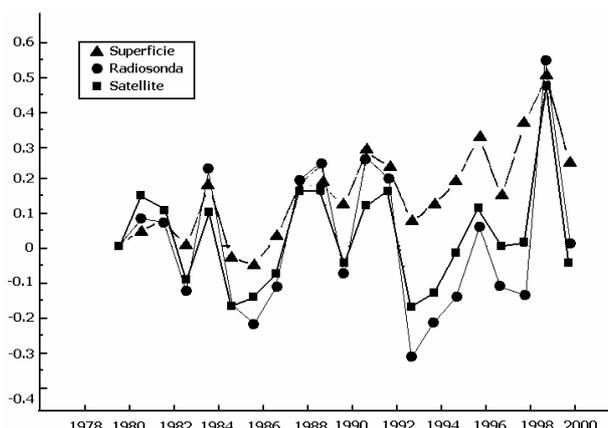


Fig. 13 – Temperature medie annuali globali ricavate da dati di stazioni di superficie, satelliti e radiosonde

Fig. 13 - Yearly global mean temperatures obtained from surface stations data, satellite and soundings

1995) risultava essere addirittura negativo e corrispondente a -0.05 K per decade (figure 13 e 14).

In risposta a questi rimarchevoli risultati, un lavoro di Wentz e Schabel (1998) sottolineava che i dati da satellite risentono di variazioni dovute al decadimento dell'orbita e quindi il trend di raffreddamento sarebbe stato solo l'effetto spurio della perdita di altitudine. Secondo questo studio, se opportunamente apportate le correzioni all'altitudine, il trend sarebbe divenuto $+0.07$ K/decade e quindi molto vicino a quello mostrato dai dati di superficie.

Durante il periodo considerato si registrò in effetti un'elevata attività solare con picchi nel 1979-83 e 1989-92;

tale attività tende a riscaldare l'alta atmosfera che espandendosi nello spazio può produrre marcati effetti di freno sui manufatti orbitanti. In base a tale fenomeno si stima che il decremento orbitale dei satelliti TIROS sia stato di circa 20 km. In una risposta fornita direttamente dalla NASA, Roy Spencer fornisce una ulteriore revisione ai dati di Wentz e Schabel (tabella 6).

Sulla base di questi andamenti non solo il supposto riscaldamento globale sarebbe messo in discussione ma addirittura il sistema climatico si starebbe muovendo verso un lento progressivo raffreddamento.

Consideriamo a questo punto il nucleo rilevante dei dati: il trend satellitare sarebbe confermato nella sostanza dai trend delle misure da radiosonda mentre le misure al suolo si discostano notevolmente da questi andamenti. Si sarebbe quindi portati a pensare che se due metodologie su tre concordano, la certezza statistica starà con ampio margine di probabilità nell'andamento confermato da più tecniche.

La situazione è però assai più complicata di quanto detto, perché se è vero che le temperature superficiali possono ad esempio risentire degli effetti urbani, le misure da satellite presentano tutta una serie di crucialità.

Anzitutto infatti non sono vere e proprie temperature ma "brillanze" e cioè misure di emissione che sono proporzionali alla temperatura della superficie del corpo in virtù della legge di Stefan - Boltzmann, con una costante di proporzionalità che è nota per il cosiddetto corpo nero. Per passare dalla temperatura di superficie così stimata alla temperatura dell'aria (quella cioè che misuriamo con i termometri delle stazioni meteorologiche) occorre valutare il bilancio energetico nel suo complesso, nel quale

Fig. 14 - Serie storiche mensili globali (da 82.5°S a 82.5°N) delle anomalie delle temperature di radianza per i canali 2, 3 e 4. Nel canale 2 l'anomalia è dominata dall' ENSO (1982-83, 1987-88, e 1997-98) e da un debole riscaldamento troposferico. Il canale 4 è dominato dal raffreddamento stratosferico, interrotto dai due intensi eventi di riscaldamento legati alle eruzioni dei vulcani El Chichon (1982) e Pinatubo (1991). Il canale 3 manifesta un misto degli effetti osservati con i canali 2 e 4 (fonte: http://www.ssmi.com/msu/msu_data_description.html#msu_amsu_time_series). Con UAH viene inteso il record di temperatura della media bassa atmosfera analizzato alla University of Alabama Huntsville mentre con RSS quello analizzato dalla Remote Sensing Systems (per approfondire questa discussione è utile visitare il sito <http://www.worldclimatereport.com/index.php/2004/04/07/nothings-changed/>)

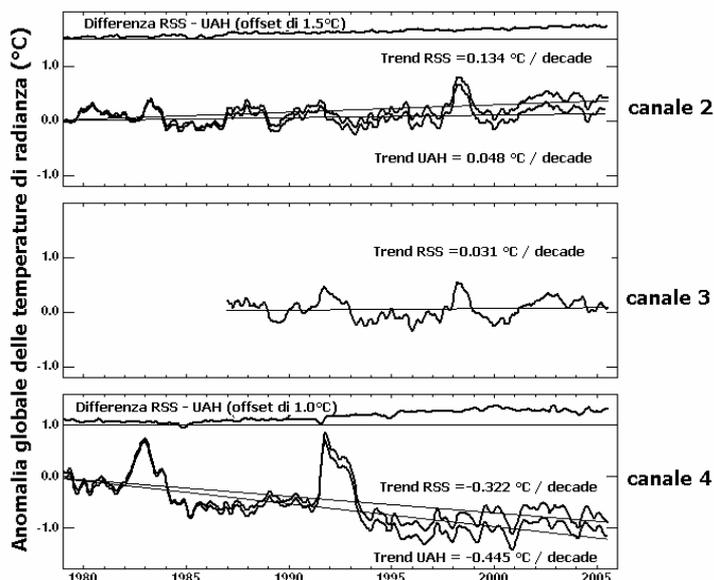


Fig. 14 - Global monthly time series (from 82.5°S to 82.5°N) of anomalies of temperature of radiance for channels 2, 3 and 4. For channel 2 the anomaly is dominated by ENSO (1982-83, 1987-88 and 1997-98) e by a weak tropospheric warming. Channel 4 is dominated by a stratospheric cooling, interrupted by two strong warming events produced by volcanic eruptions of El Chichon (1982) and Pinatubo (1991). Channel 3 presents a mix of effects shown by channels 2 and 4 (source: http://www.ssmi.com/msu/msu_data_description.html#msu_amsu_time_series). Acronyms UAH and RSS are corresponding to University of Alabama Huntsville and Remote Sensing Systems and its origins are explained at the web site: <http://www.worldclimatereport.com/index.php/2004/04/07/nothings-changed/>

Tab. 6 – Trend ricavabili da dati MSU secondo indicazioni fornite dalla NASA

(www.ghcc.msfc.nasa.gov/MSU/hl_measuretemp.htm)

Tab. 6 - Trend obtained from MSU data following informations from NASA

(www.ghcc.msfc.nasa.gov/MSU/hl_measuretemp.htm)

Trend	°C/decade
Trend da radiosondaggio (Angell/NOAA)	-0.07
Trend da satellite corretto	-0.04
Trend da radiosondaggio (Parker, UK Met Office)	-0.02
Trend da satellite corretto dalla NASA	-0.01
Trend da satellite corretto da Wentz	+0.08
Temperature terrestri e marine in superficie (U.K. Met Office):	+0.15

l'emissione del corpo rappresenta solo una delle voci; da tale bilancio, noti i flussi di radiazione netta, di calore latente e di calore del suolo si può ricavare il flusso di calore sensibile che a sua volta è proporzionale alla differenza fra temperatura dell'aria e temperatura della superficie.

Si tenga poi presente che le “brillanze” sono rilevate da un sensore che, come si è detto, è mobile e non fisso nello spazio, e che percepisce una risposta bidimensionale dal sistema terrestre che è in tre dimensioni.

Il sistema terrestre presenta infatti una propria spazialità bidimensionale rappresentata dalla superficie ma anche una struttura atmosferica verticale nella quale sono in atti molteplici processi fisico-chimici. Gli scambi di calore e di entalpia determinano delle stratificazioni che influiscono differenzialmente sul bilancio radiativo complessivo e quindi sulla brillantezza vista dal satellite e poi trasformata in “temperatura”.

Per potere inferire i diversi contributi, rappresentati poi da veri e propri processi fisici, i satelliti hanno a bordo sensori multispettrali che leggono la superficie a diverse lunghezze d'onda e che, mediante le cosiddette “funzioni peso” (figura 15) e tecniche di combinazione, permettono di evidenziare il singolo fenomeno o il comportamento di un determinato livello (strato) atmosferico.

I diversi livelli atmosferici, compreso lo stesso suolo, potranno quindi presentare trend diversi l'uno dall'altro, contribuendo più o meno a sostenere l'ipotesi del riscaldamento. Nel lavoro di Hurrell e Trenberth (1997), riportato più estesamente in un manoscritto sottomesso lo stesso anno ma pubblicato successivamente (Hurrell e Trenberth, 1998), vengono valutati i singoli contributi ed in particolare l'effetto spurio del suolo nella rilevazione da satellite. Purtroppo, nonostante gli sforzi degli autori per estrarre la giustificazione fisica delle differenze nei trend, lo studio si conclude con l'esclusiva sentenza che i trend satellitari devono essere considerati con “prudenza” ammettendo però che forniscono una ottima base di dati per lo studio della variabilità interannuale.

La rapidissima lettera di Christy *et al.* (1997) sulla stessa rivista con allegata risposta di Trenberth e Hurrell, unitamente alla dialettica con Wentz e Schabel sul fattore

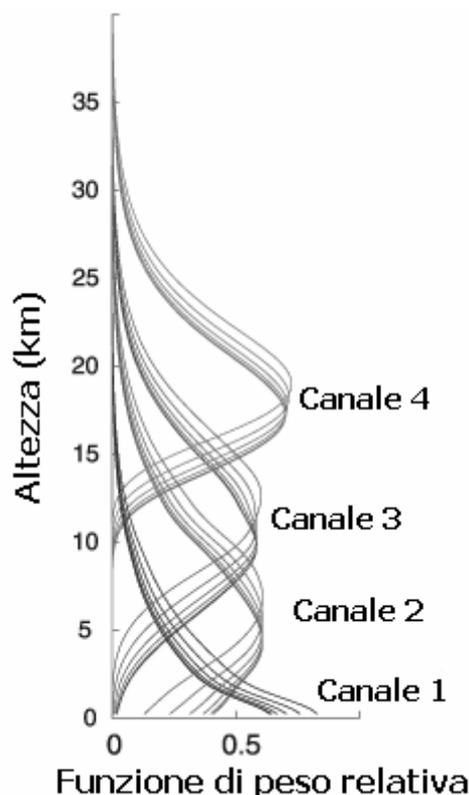


Fig. 15 – Funzioni peso utilizzate per i sensori MSU con lo scopo di suddividere i diversi contributi atmosferici

Fig. 15 – Weight functions used for MSU sensors in order to subdivide different atmospheric contributions

“falling satellite”, dimostra che il dibattito relativo alle discrepanze tra rete di terra e satelliti-radiosonde, anche se apparentemente basato sul mero dato tecnico della precisione, è diventato un nodo sul quale due comunità scientifiche stanno confrontando, anche in modo acceso, le proprie teorie.

Dopo questo primo periodo di dibattito basato su alcune caratteristiche tecniche dei sensori si viene a sviluppare un ancor più accentuato scontro sulle ipotizzate modifiche differenziali della struttura termica dell'atmosfera dovuta ai diversi aspetti del riscaldamento globale e ad altri processi a macroscale.

La riduzione, ad esempio, dell'ozono stratosferico può produrre non solo un raffreddamento della bassa stratosfera ma anche dell'alta troposfera portando ad una significativa riduzione del riscaldamento da gas serra., così come le eruzioni vulcaniche (come quella del Monte Pinatubo del 1991) possono generare un riscaldamento stratosferico ed un raffreddamento troposferico causati dal nuovo equilibrio radiativo prodotto dalle particelle emesse nei diversi eventi eruttivi.

Lo studio di Bengtsson *et al.* (1999) prende in considerazione i diversi effetti citati per giungere a valutare la compatibilità dei diversi dati set strumentali con la principale modellistica climatica. Il trend della temperatura superficiale per il periodo 1979-1997 ottenuto da tale autore risulta compreso fra +0.19 e +0.04 K e quindi ap-

pare molto più conservativo rispetto alle ipotesi del riscaldamento globale.

Uno studio importante condotto sui cambiamenti multi-decadali della struttura verticale atmosferica ai tropici (Gaffen *et al.*, 2000) espone chiaramente le problematiche relative ai diversi processi ed ai relativi effetti sui trend di temperatura tra la superficie e 300 hPa (figura 16). Le conclusioni del lavoro suggeriscono che per una simulazione più realistica delle forzanti climatiche devono essere tenuti in dovuta considerazione sia gli effetti antropici che quelli naturali. Il controllo di qualità dei dati delle radiosonde condotto in relazione allo studio suddetto viene pubblicato nello stesso anno (Gaffen *et al.*, 2000b). Anche in questo caso i risultati relativi ai trend di temperatura prodotti per l'Australia riducono considerevolmente i valori di riscaldamento previsti (figura 17).

Sono diverse decine gli studi pubblicati sull'argomento negli anni 2000-2004 e si può vedere come due fronti abbastanza compatti si combattano a colpi di calibrizioni e ri-calibrizioni. Nell'acceso dibattito le due riviste Science e Nature sembrano dividersi, la prima ospitando le pubblicazioni che sostengono la teoria del basso, o nullo, trend e la seconda ospitando quelle a favore di un più elevato trend delle temperature globali.

Nessuno dei lavori prodotti ha fornito una risposta definitiva a questo problema cruciale per cui un quadro riasuntivo dell'effettivo stato dell'arte è forse reso da due recentissime pubblicazioni.

La prima è quella di Christy e Norris (2004), i quali rivedono l'effettiva attendibilità dei data set disponibili alla luce della bibliografia completa e giungono a concludere che per quanto riguarda la stratosfera il livello di incertezza è molto elevato ed è pertanto necessario rimandare una risposta a studi futuri mentre per la bassa troposfera i risultati supportano la conclusione che il trend globale sia di $+0.08 \pm 0.05$ K/decade.

Il secondo studio (Douglass *et al.* 2004) incentra la propria attenzione sui trend delle temperature per fasce latitudinali; in tabella 7 sono riportati i valori delle temperature superficiali (ST), le già citate misure da satellite (MSU) ed i valori di rianalisi prodotti dall'NCAR.

Non possiamo però pensare che si sia stata scritta la parola fine a questo capitolo della ricerca. Infatti, altre recenti "letters" fanno presagire l'uscita di ulteriori revisioni ai valori dei trend. Inoltre nuovi aspetti della ricerca di base, interpretando più approfonditamente i meccanismi di scambio delle diverse quantità fisiche alle diverse quote, possono apportare sostanziali modifiche nella visione d'insieme del sistema climatico fornendo così nuove chiavi di lettura per i dati.

Quale ultima nota di curiosità scientifica si può aggiungere che negli studi più recenti viene focalizzato tra i problemi principali quello della variabilità del regime del gradiente termico atmosferico. Tale variabilità potrebbe sia influenzare in modo considerevole le discrasie tra i diversi record sperimentali sia determinare alcuni caratteri fisici di base quale ad esempio la quota dello zero termico che manifesta importanti conseguenze sull'avanzamento o arretramento dei ghiacciai. La curiosità sta nel fatto che nel 1979, cioè all'inizio di queste ricerche, Stone e Carlson individuavano importanti conse-

Tab. 7 – Trend di temperatura (°C/decade) riferiti al periodo 1979-96 per misure di superficie, MSU e rianalisi.

Tab. 7 – Trend of temperature (°C/decade) referred to 1979-96 period for surface measurements, MSU e re-analysis.

Area di riferimento	Misure di superficie	MSU	Rianalisi NCAR
Nord (35 °N–60 °N)	0.224	0.244	0.228
Tropici (20 °S–20 °N)	0.092	-0.057	-0.054
Sud (20 °S–40 °S)	0.043	0.020	-0.121
Globale (60 °N–40 °S)	0.106	0.027	0.014
Globale (tutti i dati disponibili)	0.106	-0.005	0.015

guenze sia stagionali che latitudinali proprio sul gradiente termico verticale, domandandosi se considerare solo le variazioni nella struttura latitudinale del campo termico ignorando completamente quelle verticali come nei modelli di Budyko (1969) e Sellers (1969) non fosse una questione da tenere aperta all'investigazione.

Bibliografia

- Bengtsson, L., E. Roeckner, M. Stendel, 1999. Why is the global warming proceeding much slower than expected? *J. Geophys. Res.*, 104, 3865-3876.
- Budyko M.L., 1969. The effect of solar radiation variation on the climate of the earth. *Tellus*, 21, 611-619.
- Christy, J. R., and R. T. McNider, 1994. Satellite greenhouse signal. *Nature* 367, 325.
- Christy J. R., R. W. Spencer, R. T. McNider. Reducing the noise in MSU daily lower tropospheric global temperature data set. *J. Climate*, 8, pp. 888-896, 1995.
- Christy, J.R., R.W. Spencer, W.D. Braswell, 1987. How accurate are satellite thermometers? *Nature*, 389, 342-343.
- Christy J.R., W.B. Norris, 2004. What may we conclude about global tropospheric temperature trends? *Geophys Res. Lett.*, 31, L06211.
- Daley R., 1993. *Atmospheric data analysis*, Cambridge Univ. Press, 456 pp.
- Gaffen D. J., B. D. Santer, J. S. Boyle, J. R. Christy, N. E. Graham, R. J. Ross, 2000. Multidecadal changes in the vertical temperature structure of the tropical troposphere. *Science*, 287, 1242-1245.
- Hurrell, J.W e K.E. Trenberth, 1997. Spurious trends in satellite MSU temperatures from merging different satellite records. *Nature*, 386, 164-167.
- Hurrell, J.W, K.E. Trenberth, 1998. Difficult in obtaining reliable temperature trends: reconciling the surface and satellite microwave sounding unit records. *J. Climate*, 11, 945-967.
- Mariani L., 2002. *Dispensa di agrometeorologia*. Clesav, 292 pp.
- Richardson L.F., 1922. *Weather prediction by numerical process*, Cambridge University Press.
- Sellers W.D., 1969. A climate model based on the energy balance of the earth-atmosphere system. *J. Appl. Meteor.*, 8, 392-400.
- Spencer, R.W., J.R. Christy, 1990. Precise monitoring of global temperature trends from satellite. *Science*, 247, 1558-1562.
- Spencer, R.W., J.R. Christy e N.C. Grody, 1990. Global atmospheric temperature monitoring with satellite microwave measurements: Method and results. *J. Climate*, 3, 1111-1128.
- Spencer, R.W., J.R. Christy, 1992. Precision and radiosonde validation of satellite gridpoint temperature anomalies. PartII: a tropospheric retrieval and trends during 1979-90. *J. Climate*, 5, 858-866.
- Stone P.H., J. H. Carlson, 1979. Atmospheric lapse rate regimes and their parameterisation. *J. Atmos. Sci.*, 36, 415-423.
- Wentz, F., Schabel, M., 1998. Effects of orbital decay on satellite-derived lower tropospheric temperature trends. *Nature*, 394:661-664.

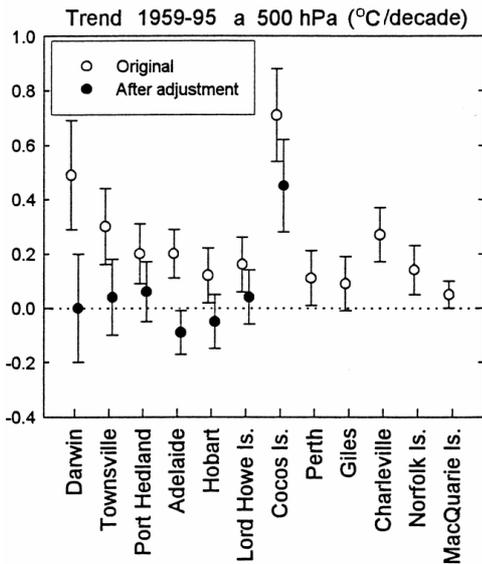


Fig. 17 – Trend 1959-95 delle temperature all'altezza di 500 hPa per alcune stazioni australiane (Gaffen *et al.* 2000b)

Fig. 17 - Trend 1959-95 of temperature at 500 hPa high for some Australian stations (Gaffen *et al.* 2000b)

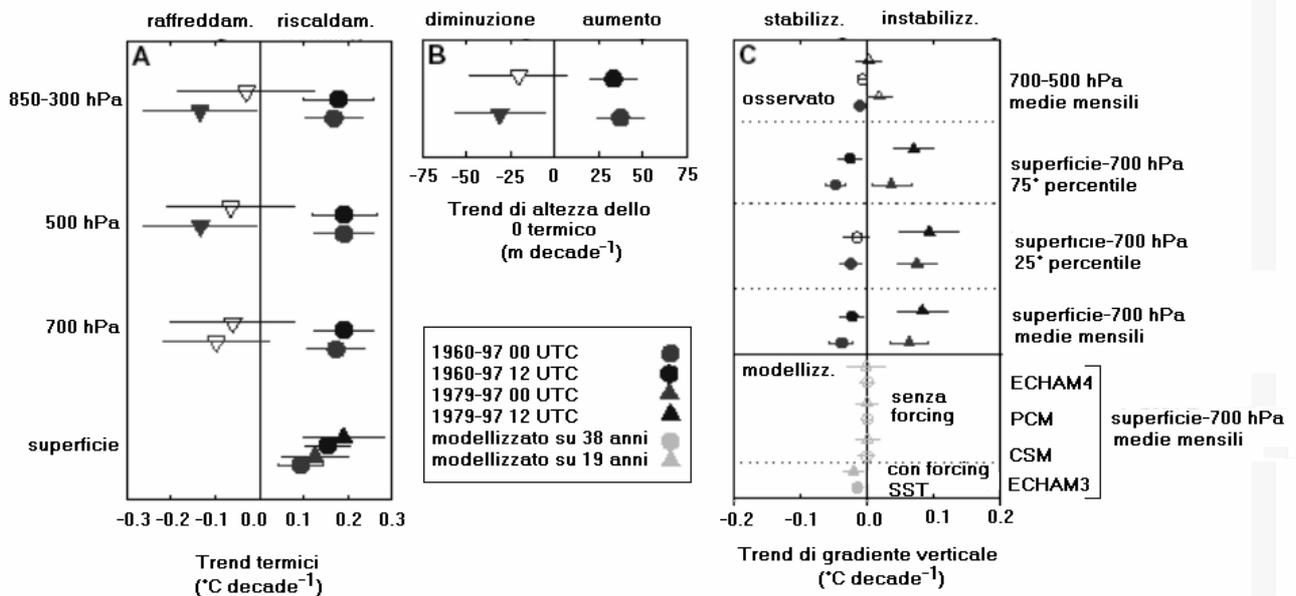


Fig. 16 - Trend di temperatura, di altezza dello zero termico e di gradiente termico verticale. In A si riportano i trend delle anomalie termiche medie mensili in atmosfera tropicale per il 1960-97 (cerchi) ed il 1979-97 (triangoli) con i relativi intervalli di confidenza. I simboli pieni indicano trend significativamente differenti da 0 con livello di confidenza del 95% e gli apici dei triangoli verso l'alto o verso il basso indicano rispettivamente trend positivi e negativi. I trend basati su osservazioni delle ore 0 e 12 UTC sono riportati rispettivamente in rosso ed in blu. I trend in superficie, a 700 e a 500 hPa sono basati su dati di radiosondaggio. I trend per lo strato fra 850 e 300 hPa sono basati su dati medi giornalieri di temperatura virtuale dello strato. Le medie per il periodo 1970-97 sono basate su dati di 29 stazioni e quelle del periodo 1979-97 sono basate su dati di 58 stazioni. I trend di altezza dello zero termico (B) ed i trend di anomalia del gradiente termico verticale in area tropicale (C) sono calcolati sullo stesso dataset utilizzato per A. I trend dei dati da modello con SST forcing sono basati sulla media di un ensemble di 10 membri di temperature simulate con ECHAM3 per gli stessi anni relativi alle osservazioni (da Gaffen *et al.* 2000)

Fig. 16 - Trend of temperature, thermal lapse rate and 0° height. A represents the trends of mean monthly anomalies in tropical atmosphere for 1960-1997 (circles) and 1979-1997 (triangles) with the respective confidence intervals. Filled symbols show trends that differ significantly from 0 with a confidence of 95%; upward and downward apexes of triangles represent respectively positive and negative trends. Trends based on observations at 00 and 12 UTC are respectively represented in red and blue. Trends at surface, at 700 and 500 hPa area based on sounding data. Trends of the layer between 850 and 300 hPa are based on daily mean virtual temperature data. Averages for 1970-1997 are based on data of 29 stations and averages for 1979-1997 are based on data of 58 stations. Trend of height of 0°C (B) and trends of anomaly of thermal lapse rate in tropical area (C) are calculated on the same dataset used for A. Trends of data from a model with a SST forcing are based on the mean of an ensemble of 10 members of temperatures simulated with ECHAM3 for the same years referred to observation (Gaffen *et al.* 2000)

6. Paleoclimatologia

6.1 Proxy data fisici e biologici

Il sistema climatico ha la stessa età della Terra, cioè circa 4,5 miliardi di anni il che induce a pensare che un sufficiente livello di comprensione dei meccanismi propri di un sistema così ricco di storia potrà essere raggiunto solo indagando il clima su periodi di tempo significativamente lunghi, sui quali abbia avuto modo di estrinsecarsi un numero sufficientemente elevato delle possibili combinazioni fra le migliaia di variabili guida caratteristiche del sistema nel suo complesso e dei sottosistemi che lo compongono.

A fronte di tale esigenza disponiamo oggi al massimo di tre secoli di serie storiche di dati strumentali (temperature, precipitazioni, ecc.); infatti i primi strumenti meteorologici furono creati nell'ambito della scuola di Galileo e la prima rete meteorologica, quella toscana dell'Accademia del Cimento, fu attivata nel 1654. L'assoluta inadeguatezza di tale periodo si fa lampante se si considera che, posta pari a 24 ore l'età della Terra, gli ultimi 300 anni corrispondono a meno di 6 millesimi di secondo.

Queste in estrema sintesi le ragioni fondanti della paleoclimatologia, branca della climatologia che indaga i climi di epoche precedenti rispetto alla nascita degli strumenti meteorologici. Tale disciplina si basa sullo studio delle cosiddette proxy series e cioè su serie storiche relative a variabili fisiche (tenore di O_{16} e O_{18} nelle carote glaciali, spessore dei sedimenti fluviali o lacustri, ecc.) o biologiche (pollini, cerchie di accrescimento degli alberi, macro e microfossili, ecc.) in qualche misura legate alle variabili climatiche.

Con l'ausilio di proxy series è stato ad esempio possibile ricostruire l'andamento termico e pluviometrico su periodi di lunghezza rilevante, fino a parecchi milioni di anni orsono. Occorre tuttavia precisare che i livelli di incertezza insiti in tali ricostruzioni sono elevati. Ad esempio l'uso delle cerchie di accrescimento di specie caducifoglie mesofile (es: *Quercus petraea*) risulta solo parzialmente adatto a valutare l'andamento delle temperature medie annuali, in quanto la crescita di tali essenze risulta condizionato soprattutto dalla temperatura e dalla piovosità del periodo primaverile-estivo, mentre le temperature invernali non hanno effetto sull'accrescimento ove si mantengano al di sopra delle temperature critiche minime e garantiscano un cumulo di ore di freddo atte a soddisfare le esigenze di vernalizzazione proprie di molte di queste specie. Un altro esempio è dato dai problemi di aliasing riscontrabili nell'analisi di serie sedimentarie sottocampionate rispetto al fenomeno da indagare (Wunsch e Gunn 2003).

La letteratura paleoclimatica appare assai vasta ed altrettanto vasta è la gamma di riviste scientifiche su cui tali lavori sono pubblicati, in virtù dell'elevato grado di interdisciplinarietà che caratterizza tali ricerche. Ne consegue che ci limiteremo a fornire alcuni esempi rimandando alla curiosità del lettore approfondimenti più specifici.

Tuffarsi negli abissi del tempo significa anzitutto giungere a 2 miliardi di anni orsono, nel periodo cioè in cui ebbe forse inizio la vita sul nostro pianeta, vita che si

sviluppò nei mari poiché le terre emerse erano del tutto inabitabili per svariati motivi (Mariani, 2002). La colonizzazione delle terre emerse poté aver inizio solo con la diffusione dell'ossigeno, frutto dei processi fotosintetici, e con la formazione delle fasce di ozono che bloccavano l'ultravioletto. Scendendo il fiume del tempo giungiamo ad un'altra tappa cardine costituita dalla comparsa delle fanerogame, avvenuta circa 545 milioni di anni orsono. Ha così inizio il fanerozoico, periodo caratterizzato da una consistente variabilità del clima e da una serie di eventi di estinzione, indicati dalle frecce in figura 18. Fra tali eventi spiccano anzitutto quello del Devoniano superiore (345 milioni di anni orsono), scomponibile in tre sottocrisi e quella del Permiano superiore, accaduta 248 milioni di anni fa. E' questa la crisi biologica di gran lunga più violenta della storia della Terra, nella quale scomparve fra il 75 ed il 96% delle specie nei mari e nelle terre emerse (Pinna, 2000). Abbiamo poi la crisi del Triassico superiore (219 milioni di anni fa), scomponibile in due sottocrisi ed infine la crisi biologica più recente e più celebre, quella del Cretacico superiore (65 milioni di anni fa) che vide la scomparsa dei dinosauri aprendo la strada alla fauna moderna (mammiferi e non solo). A volte è salutare riandare al turbolento passato biologico del pianeta per contrastare la vulgata scientificamente infondata e che ahinoi riecheggia in lavori pubblicati su prestigiose riviste internazionali (McGuffie e Henderson-Sellers, 2001), secondo cui la vita si sarebbe evoluta in condizioni di equilibrio che ora e solo ora sono messe a repentaglio dalla nostra specie.

Sulle cause dei grandi eventi di estinzione il dibattito è più che mai aperto e la causa climatica è periodicamente portata all'attenzione. Si veda in proposito la vasta attività pubblicistica relativa alla crisi del Cretacico e discussa ad esempio da Pinna (2000).

Il clima del fanerozoico è indagato con strumenti di tipo geologico (studio degli isotopi radioattivi dell'ossigeno) ed il risultato di tali indagini è riportato in figura 18 (Frakes e Francis, 1998).

Avvicinandoci a grandi passi all'attualità giungiamo al pleistocene (ultimi due milioni di anni) ed alla glaciazione di Wurm all'Olocene, momento cruciale per l'affermarsi dell'uomo moderno (*Homo sapiens sapiens*). Al termine di quest'ultima glaciazione, in coincidenza con il cosiddetto Dryas recente, si verifica un evento cruciale per la storia umana e cioè registra la nascita dell'agricoltura (rivoluzione neolitica). Sul rapporto fra rivoluzione neolitica e clima il dibattito è aperto (Salamini *et al.*, 2002) così come aperto è il dibattito sul ruolo del clima in alcuni eventi storici epocali (Mariani, in corso di stampa).

In termini generali possiamo dire che lo studio paleoclimatico dell'olocene può avvalersi di un numero assai elevato di proxy series individuali, provenienti da varie parti del globo (Davisa *et al.*, 2003; David, 1997; Heikkila e Seppa, 2003; Magnya *et al.*, 2003; Rossignol-Strick M., 1999; Tarasov *et al.*, 1999, Jalut *et al.* 2000); purtroppo tali serie mostrano un'ampia divergenza nel comportamento e nella temporizzazione degli eventi più significativi. Ciò rende ardua la ricostruzione di record delle temperature medie per il nostro emisfero davvero

accurati. Ad esempio, a seconda della serie esaminata, la differenza di temperatura fra il picco del Periodo Caldo Medievale – PCM (1000-1200 d.C.) ed il picco negativo della successiva Piccola Era Glaciale – PEG (1650-1830) si colloca in un range compreso fra 0.3 e 2°C (Keller, 2004). Tale variabilità giustifica le attività di studio volte a raccogliere ed omogeneizzare le diverse serie in modo da ottenere un record unico di temperatura emisferica (Overpeck *et al.*, 1997; Jones *et al.*, 1998; Man *et al.*, 1999, Crowley e Lowery, 2000, Esper *et al.*, 2002). Tuttavia gli autori di tali raccolte si trovano sovente di fronte a singole proxy series che mostrano variazioni molto ampie, il che starebbe secondo alcuni ad indicare la presenza di una notevolissima variabilità spaziale dei fenomeni. A fronte di ciò si spera che lo studio delle temperature in grotta possa in futuro consentire un'interpretazione univoca degli eventi climatici del passato. Tali studi, di cui alcuni risultati sono riportati in Keller (2004) sono basati sul presupposto che l'onda termica si propaga nel sottosuolo con una certa velocità, per cui misure eseguite all'interno di cavità sotterranee naturali a profondità crescenti consentono di spingerci sempre più lontano nel passato. Non si deve tuttavia trascurare il fatto che i dati in grotta presentano le seguenti principali limitazioni:

1. non rendono conto delle fluttuazioni di breve periodo limitandosi a fornire indicazioni circa le ciclicità maggiori (es: fase calda medievale);
2. risentono dei cambiamenti nella copertura del suolo sovrastante che alterano la quantità di energia assorbita dalla superficie.

Nel periodo più recente si deve altresì segnalare le polemiche innescate dai lavori di paleoclimatologia di Mann *et al.* (1998 e 1999). In particolare, ha suscitato un serrato dibattito la ricostruzione delle temperature degli ultimi due millenni effettuata da Mann e sintetizzata in un grafico (noto al grande pubblico come “mazza da hockey”) dal quale emerge il fatto che le temperature del periodo 1980-2000 non avrebbero precedenti negli ultimi due millenni. Per inciso le conclusioni di Mann sono state fatte proprie dall' Intergovernmental Panel on Climate Change nel proprio report del 2001 (*Climate Change 2001: The Scientific Basis*).

La metodologia impiegata da Mann è stata sottoposta ad una critica severa da tre lavori di McIntyre and McKittrick (2003, 2005a, 2005b) e più recentemente da un'analisi indipendente (il cosiddetto “rapporto Wegman”) sviluppata da un comitato di tre docenti universitari statunitensi esperti in statistica (Wegman *et al.*, 2006).

In particolare, il “rapporto Wegman”, in circa 100 pagine di analisi, mette in luce una serie di inconsistenze del lavoro di Mann, evidenziando un grave errore nell'applicazione del metodo statistico adottato, errore che si è tradotto nell'enfaticizzazione del riscaldamento della fine del 900. Il rapporto mette inoltre in luce lo scarso rigore e l'assenza di reale indipendenza nelle attività di referaggio che secondo il rapporto sarebbe la conseguenza del formarsi di comunità scientifiche troppo ristrette (nello specifico quella del paleoclimatologi). Inoltre il rapporto Wegman sottolinea che:

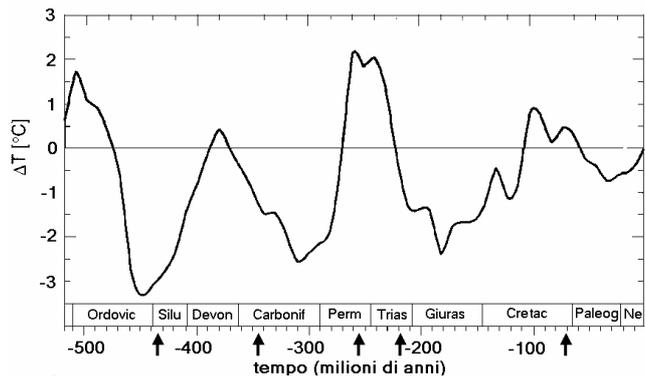


Fig. 18 – Temperatura, espressa come differenza rispetto alla temperatura odierna, dello strato oceanico superficiale nel fanerozoico, ricostruita analizzando il livello di O^{18} nei gusci di molluschi. Le frecce indicano i grandi eventi di estinzione di specie animali e vegetali registrati in quel periodo.

Fig. 18 – Temperature, expressed as difference from present day temperature of surface oceanic layer in Phanerozoic, obtained from the analysis of O^{18} in shells of molluscs. Arrows show the main extinction events of plants and animals of that period.

1. sulla base dei lavori di Mann non è possibile affermare che gli anni '90 del 20° secolo siano realmente stati i più caldi degli ultimi 2000 anni in quanto la metodologia impiegata ha soppresso l'informazione a bassa frequenza
2. il lavoro di Mann ha attribuito alla sola temperatura lo sviluppo dei vegetali osservabile dai dati dendrocronologici, trascurando in tal modo l'effetto fertilizzante legato sia all'aumento di CO_2 registratosi dalla seconda metà dell'800 sia all'aumentata deposizione di nitrati manifestatasi nello stesso periodo (Graybill and Idso, 1993; Biondi *et al.*, 1999).

Aldilà del caso specifico è parere di chi scrive che il rapporto Wegman ponga alcuni problemi più generali sul rapporto scienza - politica, scienza - scienziati e scienza - mezzi di comunicazione di massa, problemi che in futuro non dovrebbero essere in alcun modo trascurati, pena il ritrovarci impreparati rispetto alle sfide conoscitive che il nostro pianeta ci propone in modo incessante.

Bibliografia

- Biondi, F., Perkins, D. L., Cayan, D. R., Hughes, M. K. (1999) "July temperature during the second millennium reconstructed from Idaho tree rings," *Geophysical Research Letters*, 26(10), 1445-1448.
- Crowley, T.J., 2000. Causes of climate change over the past 1000 years. *Science*, 289, pp. 270-277.
- Davisa B.A.S. Brewer S., Stevens A.C., Guiot J., *Data Contributors*, 2003. The temperature of Europe during the Holocene reconstructed from pollen data, *Quaternary Science Reviews* 22 (2003) 1701-1716
- David F., 1997. Holocene tree limit history in the northern French Alps: stomata nad pollen evidence, *Review of paleobotany and palynology*, 97, 227-239.
- Frakes, L.A., and Francis, J.E., 1998, A guide to Phanerozoic cold polar climates from high latitude ice-rafting in the Cretaceous: *Nature*, v. 333, p. 547-549.

- Graybill, D.A., Idso, S.B. 1993 "Detecting the aerial fertilization effect of atmospheric CO₂ enrichment in tree-ring chronologies," *Global Biogeochemical Cycles* 7, 81-95.
- McGuffie K., Henderson-Sellers A., 2001. *Fourty years of climate modelling*, *International Journal of Climatology*, 21: 1067-1109.
- Heikkilä M., Seppä H., 2003. A 11,000 yr palaeotemperature reconstruction from the southern boreal zone in Finland, *Quaternary Science Reviews* 22 (2003) 541-554.
- Jalut G., Amat A.E., Bonnet L., Gauquelin T., Fontugne M., 2000. Holocene climatic changes in the Western Mediterranean, from south-east France to south-east Spain, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 160 (2000) 255-290
- IPCC, 2001. *Third Assessment Report - Climate Change 2001*. www.ipcc.ch (reperibile in rete)
- Jones, P.D., Briffa, K.R., Barnett, T.P., Tett, S.F.B., 1998. High-resolution palaeoclimatic records for the last millennium: interpretation, integration and comparison with General Circulation Model control-run temperatures., *The Holocene* 8(4), 455-471.
- Keller C.F., 2004. 1000 years of climate change, *Advances in space research*, 34 (2004), 315-322.
- Magnya M., Begeot C., Guiot J., Peyron O., 2003. Contrasting patterns of hydrological changes in Europe in response to Holocene climate cooling phases, *Quaternary Science Reviews* 22 (2003) 1589-1596
- Mann M.E., Bradley R.S., Hughes M. K., 1998. *Global-Scale Temperature Patterns and Climate Forcing Over the Past Six Centuries*, *Nature*, Vol. 392, p.779-787
- Mann, Michael E., Bradley, Raymond S., Hughes, Malcolm K. (1999) "Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations," *Geophysical Research Letters*, 26(6), 759-762.
- McIntyre, Stephen, McKittrick, Ross (2003) "Corrections to the Mann et al. (1998) proxy data base and Northern hemispheric average temperature series," *Energy and Environment*, 14, 751-771.
- McIntyre, Stephen, McKittrick, Ross (2005a) "The M&M critique of MBH98 Northern hemisphere climate index: Update and implications," *Energy and Environment*, 16(1), 69-100.
- McIntyre, Stephen, McKittrick, Ross (2005b) "Hockey sticks, principal components, and spurious significance," *Geophysical Research Letters*, 32, L03710, doi: 10.1029/2004GL021750
- Mariani L., in corso di stampa. *Clima ed agricoltura in Europa e nel bacino del Mediterraneo dalla fine dell'ultima glaciazione*, *Rivista di Storia dell'Agricoltura*.
- Overpeck, J., K. Hughen, D. Hardy, R. Bradley, R. Case, M. Douglas, B. Finney, K. Gajewski, G. Jacoby, A. Jennings, S. Lamoureux, A. Lasca, G. MacDonald, J. Moore, M. Retelle, S. Smith, A. Pinna G., 2000. *Declino e caduta dell'impero dei dinosauri*, *Il Saggiatore*, Milano, 250 pp.

- Rosignol-Strick M., 1999. *The Holocene climatic optimum and pollen records of sapropel in the eastern Mediterranean, 9000-6000 BP*, *Quaternary Science Reviews* 18 (1999), 515-530.
- Salamini F., Ozkan H., Brandolini A., Schafer-Pregl R., Martin W., *Genetics and geography of wild cereals domestication in the near East*, *Nature*, vol. 3, june 2002.
- Tarasov P.E., Guiot J., Cheddadi R., Andreev A.A., Bezusko L.G., Blyakharchuk T.A., Dorofeyuk N.I., Filimonova L.V., Volkova V.S., Zernitskaya V.P., 1999. *Climate in northern Eurasia 6000 years ago reconstructed from pollen data* *Earth and Planetary Science Letters* 171 (1999) 635-645
- Wegman E.J., Scott D.W., Said Y.H., 2006. *Ad hoc committee report on the 'hockeystick' global climate reconstruction*, energycommerce.house.gov/108/home/ (disponibile in rete).
- Wolfe, G. Zielinski, 1997. *Arctic environmental change of the last four centuries*. *Science*, 278, 1251-1256.
- Wunsch C., Gunn D.E., 2003. *A densely sampled core and climate variable aliasing*, *Geo-Marine Letters*, Springer-Verlag, Heidelberg, Vol.23, n.1, August 2003, pp. 64-71

6.2 Le carote glaciali

La geologia ha da tempo fornito una risposta esauriente alla domanda se il clima sia da considerarsi una entità statica e questa risposta è sicuramente negativa. Le misurazioni condotte sulle carote raccolte in ambienti glaciali dimostrano inequivocabilmente la variabilità ed anche la spiccata ciclicità dei fenomeni climatici ovvero del clima stesso (Petit *et al.*, 1999).

La più nota evidenza la si è ottenuta dai carotaggi effettuati in Antartide presso la base di Vostok (figura 19) dai quali si possono ottenere informazioni climatiche risalenti fino a 650.000 anni orsono (Siegenthaler *et al.*, 2005). Più recenti trivellazioni effettuate sempre in Antartide a Dome C (Progetto EPICA) permettono di risalire fino a 740.000 anni nel passato (figura 20).

Da tali rilevamenti si ricava che la temperatura e la concentrazione di CO₂ oscillano in fase con un caratteristico andamento a dente di sega. L'elevatissima correlazione fra le due variabili non può essere imputata al caso ma allo stato attuale non siamo in grado di fornire una spiegazione scientifica inconfutabile di tale fenomeno. Occorre tuttavia segnalare che lavori recenti riferiti alle ca-

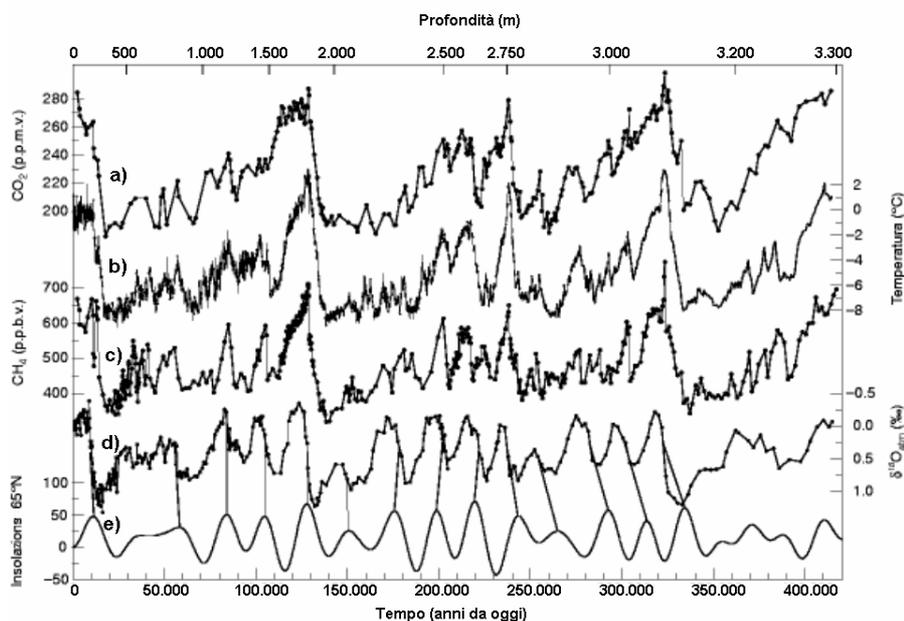


Fig. 19 - Serie storiche di Vostok e insolazione. Serie rispetto al tempo (scala dei tempi sull'asse inferiore e scala delle profondità nel ghiaccio su quello superiore) di: a) CO₂; b) temperatura isotopica dell'atmosfera c) CH₄; d) ¹⁸O atmosferico e e) insolazione a 65 °N (in W m⁻²) (adattata da Petit *et al.*, *Nature* 1999)

Fig. 19 - Vostok time series and insolation. Series with respect to time (timescale for ice on the lower axis, with indication of corresponding depths on the top axis) of: a, CO₂; b, isotopic temperature of the atmosphere (see text); c, CH₄; d, ¹⁸O atm; and e, mid-June insolation at 65 °N (in W m⁻²) (adapted from Petit *et al.*, *Nature* 1999)

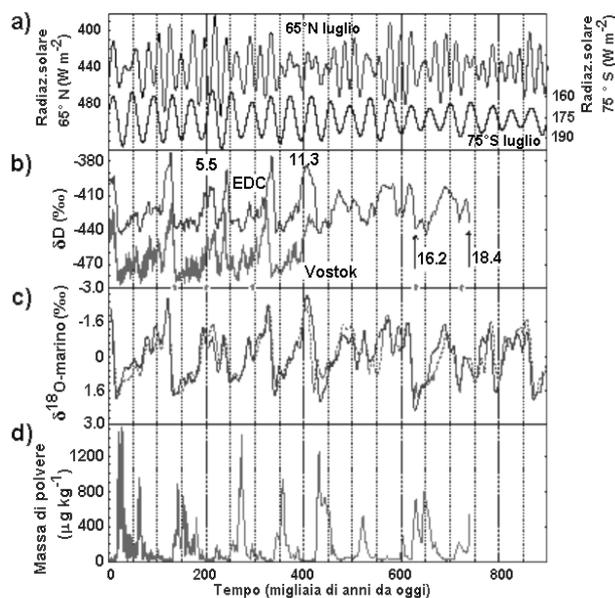


Fig. 20 - Confronto dei dati di EPICA Dome C con altri dati paleoclimatici: a) dati di insolazione a metà luglio a 65 °N (curva alta, asse sinistro) e dati di insolazione a metà luglio a 75 °S, la latitudine di Dome C (curva bassa, asse destro); b) δD (contenuto in deuterio) per EPICA Dome C (medie di 3000 anni). Vostok δD è mostrata per un raffronto; c) la serie storica isotopica di ¹⁸O marino; d) polvere di EPICA Dome C.

Fig. 20 – Comparison of EPICA Dome C data with other paleoclimatic records: a) insolation records: annual mean insolation at 65 °S, upper curve (left axis) annual mean insolation at 75 °S, the latitude of Dome C b) δD (deuterium content) from EPICA Dome C (3000-yr averages). Vostok δD is shown for comparison; c) marine oxygen isotope record d) dust from EPICA Dome C.

rote glaciali di Vostok hanno evidenziato che l'aumento di CO₂ conseguente alla fine di un'era glaciale si manifesta 600-1000 anni dopo l'aumento delle temperature (Caillon *et al.*, 2003; Siegenthaler *et al.*, 2005), il che starebbe ad indicare che l'aumento della CO₂ non è il motore della transizione glaciale – interglaciale ma tutt'al più l'effetto dell'aumento delle temperature sugli ecosistemi. Ciò non esclude ovviamente che la CO₂ possa essere la principale variabile guida delle temperature di superficie nel periodo interglaciale e tuttavia elimina una possibile prova più a volte utilizzata dai sostenitori di tale teoria. Sempre con riferimento alla serie di Vostok, si può osservare una spiccatissima ciclicità temporale sincrona relativa a temperatura, CO₂, contenuto isotopico dell'ossigeno e GHG (gas serra). In questo ultimo periodo del quaternario sono infatti evidenti quattro cicli glaciali-interglaciali della durata di circa 100.000 anni ognuno (figura 19). Non potendo evidentemente invocare effetti antropici bisogna cercare una causa naturale. La variabilità dell'orbita terrestre unitamente alle variazioni dell'input di energia radiante non sono però del tutto sufficienti a spiegare completamente il fenomeno.

Tab. 7 bis – Gli ultimi periodi glaciali e interglaciali
Tab. 7 bis - The last glacial and interglacial periods

denominazione	Periodo	Durata (migliaia di anni)	Periodo (anni BP)
Würm	glaciale	65	10.000 - 75.000
Riss-Würm	interglaciale	45	75.000 - 120.000
Riss	glaciale	80	120.000 - 200.000
Mindel-Riss	interglaciale	100	200.000 - 300.000
Mindel	glaciale	100	10.000 - 75.000
Günz-Mindel	interglaciale	100	400.000 - 500.000
Günz	glaciale	150	500.000 - 650.000
Donau-Günz	interglaciale	350	650.000 - 1.000.000
Donau	glaciale	500	1.000.000 - 1.500.000

L'analisi del carotaggio effettuato a Dome C evidenzia otto cicli glaciali-interglaciali che presentano identici andamenti relativi al periodo della serie di Vostok ma che sono caratterizzati da meno marcati riscaldamenti nei periodi interglaciali e da una più alta proporzione di periodo trascorsa in fase calda fra 740.000 e 430.000 anni fa (EPICA Community members, 2004).

Prima di analizzare più in dettaglio alcune caratteristiche delle serie è importante ricordare che misure condotte su carote estratte dai ghiacciai della Groenlandia manifestano un'importante sincronizzazione, per quanto riguarda il metano, con quelle dei carotaggi antartici negli ultimi 10.000 anni (Raynaud *et al.*, 2000).

Attenendosi alla sola serie di Vostok, a noi più vicina temporalmente, gli studi condotti con tecniche statistiche, spettrali o a "wavelet" hanno evidenziato il contributo dell'effetto dovuto alle forzanti orbitali ma a questo dev'essere aggiunto un ulteriore contributo rispetto al quale si stanno confrontando molte teorie. Presenza di ceneri vulcaniche, concentrazioni di gas e composizione isotopica fanno supporre che la coincidenza di situazioni orbitali sia favorita dalla presenza di gas serra nello sviluppare le condizioni che contribuiscono al passaggio dalla fase glaciale alla fase interglaciale (Lorius *et al.*, 1990).

Il tema di ricerca è ulteriormente complicato dalla compresenza di fenomeni quali (i) l'isostasia (tendenza delle zolle continentali non più gravate dai ghiacci a sollevarsi durante le fasi interglaciali) e (ii) la circolazione termoaerea, che regola i grandi scambi energetici interagendo anche con la circolazione atmosferica. In letteratura è reperibile una lunga serie di modelli che, introducendo uno o più fattori e modulando poi i singoli effetti, interpretano i dati sperimentali cercando così di fornire un quadro diagnostico dei record paleoclimatici per un'applicazione prognostica riferita ai cambiamenti climatici futuri (Rutherford e D'Hondt, 2000; Marshall e Clark, 2002).

A conclusione di si deve considerare che l'individuazione dei meccanismi di passaggio tra fase glaciale ed interglaciale rappresenta una delle maggiori sfide conoscitive oggi aperte in relazione al clima, essendo riferita alla comprensione della maggior ciclicità climatica in atto sul nostro pianeta.

Bibliografia

- Caillon N., Severinghaus J.P., Jouzel J., Barnola J., Kang J., Lipenkov V.Y., 2003. Timing of Atmospheric CO₂ and Antarctic Temperature Changes Across Termination III, *Science*, 14 March 2003, vol. 299, 1728-1731.
- EPICA Community members, 2004. Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature*, 429, 623-628.
- Lorius, C. J. Jouzel, D. Raynaud, J. Hansen e H. Le Treut. 1990. Greenhouse warming, climate sensitivity and ice core data. *Nature*, 347, 139-145.
- Marshall, S.J., e P.U. Clark, 2002. Basal temperature evolution of North American ice sheets and implications for 100-kyr cycle. *Gophys. Res Lett.*, 29, 2214.
- Petit, J.R., J. Jouzel, D. Raynaud, N.I. Barkov, J-M. Barnola, I. Basile, M. Bender, J. Chappellaz, M. Davis, G. Delaygue, M. Delmotte, V.M. Kotlyakov, M. Legrand, V.Y. Lipenkov, C. Lorius, L. Pepin, C. Ritz, E. Saltzman, M. Stievenard, 1999. Climate and atmospheric history of the past 420.000 years from the Vostok ice core, *Antarctica. Nature*, 399, 429-436.
- Raynaud, D., J-M. Barnola, J. Chappellaz, T. Blunier, A. Indermuhle, B. Stauffer, 2000. The ice record of greenhouse gases: a view in the context of future changes. *Quat. Sci. Rev.*, 19, 9-17.
- Rutherford, S., e S. D'Hondt, 2000. *Nature*, 408, 72-75.
- Siegenthaler U., Stocker T.F., Monnin E., Lüthi D., Schwander J., Stauffer B., Raynaud D., Barnola J., Fischer H., 2005. Masson-Delmotte V., Jouze J., 2005. Stable Carbon Cycle-Climate Relationship During the Late Pleistocene, *Science* 25, November 2005, Vol. 310, no. 5752, pp. 1313 - 1317

7. Particolarità del sistema climatico e limitazioni all'indagine fisica per mezzo di modelli matematici

Il sistema climatico presenta le caratteristiche elencate in tabella 8. Si osservi che la variabilità è uno dei tratti distintivi del sistema climatico e si manifesta secondo due modi fondamentali (Lockwood, 2001):

- variazioni forzate come risposta del sistema climatico alle variazioni nelle forzanti esterne. Tali forzanti agiscono causando variazioni nella quantità di radiazione solare ricevuta o assorbita dal pianeta e dunque sono forzanti astronomiche (es: variabili orbitali, attività solare) ovvero forzanti terrestri (es: composizione atmosferica).
- variazioni libere legate a instabilità interne o a feedback che danno luogo a interazioni non lineari fra le varie componenti del sistema e cioè fra atmosfera, oceani, criosfera e biosfera (Peixoto e Oort, 1992).

Il clima come sistema dinamico (sistema cioè che evolve nel tempo) può essere descritto per mezzo di modelli matematici fondati su equazioni differenziali (se il tempo è visto come continuo) ovvero su differenze finite e che hanno lo scopo di ricavare indicazioni circa l'evoluzione nel tempo del sistema e la sua stabilità rispetto alle perturbazioni. In tale settore il lavoro di Lorenz (1963a, 1964) ha avuto un ruolo chiave nel definire importanza e limiti di tali modelli nello studio della variabilità climatica.

Esiste un problema ontologico rispetto alla descrizione del sistema climatico attraverso modelli matematici? Nella fisica classica l'indagine si focalizza di norma su

sistemi semplificati in cui poche cause elementari interagiscono a dare un certo effetto. Invece il sistema climatico è ricchissimo di processi non lineari e di feed-back (retroazioni e cioè inversioni nel meccanismo di causalità per cui gli effetti agiscono sulle cause) che lo portano a manifestare un comportamento imprevedibile. Tale imprevedibilità si traduce nell'impossibilità di collegare le cause agli effetti e dunque di sfruttare uno dei principali punti di forza della scienza classica, quello per cui è ad esempio possibile in base a leggi semplici descrivere l'orbita dei corpi celesti prevedendo con migliaia di anni d'anticipo l'istante in cui si verificherà un'eclisse.

Già all'inizio del XX secolo Poincaré aveva evidenziato che sistemi deterministici relativamente semplici e composti da pochi elementi potevano manifestare un comportamento aleatorio che è insito nel sistema stesso ed a cui si è dato il nome di caos deterministico. Una delle caratteristiche dei sistemi caotici è che qualunque effetto, per quanto piccolo, acquista rapidamente proporzioni macroscopiche (amplificazione) limitando seriamente la nostra possibilità di fare previsioni.

Nel caso dei sistemi caotici lo studio dello spazio della fasi mostra che il sistema evolve verso un attrattore caotico di forma più o meno complessa a seconda del sistema in esame.

L'atmosfera, componente essenziale del sistema climatico, è un fluido affetto da caos deterministico come evidenziò per la prima volta Lorenz (1963) su un semplicissimo modello matematico costituito da un sistema di tre equazioni che descrivono in modo assai semplificato il comportamento dell'atmosfera.

Nel caso specifico dei modelli matematici del fluido atmosferico i classici effetti di amplificazione tipici dei sistemi caotici si manifestano sugli errori che derivano ad esempio dalla conoscenza per forza imprecisa delle condizioni iniziali. Ciò si traduce in notevoli limiti alla possibilità di conoscere l'evoluzione futura del sistema climatico e dunque in limiti alla prevedibilità del clima. Rispetto al sistema climatico, caotico e dunque in linea di principio a prevedibilità limitata, possiamo tuttavia giungere ad alcune conclusioni avvalendoci della teoria dei sistemi dinamici ed in particolare delle due seguenti teorie (Ghil e Robertson, 2000):

Tab. 8 - Alcune caratteristiche del sistema climatico
Tab. 8 - Some characters of climatic system

Turbolento
Molto variabile
Altamente non lineare
Dissipativo
Chiuso (con lo spazio esterno scambia solo energia)
In condizioni di non equilibrio
A stati fra cui si verificano transizioni brusche
Con scarsa presenza di gradualità
Sistema quasi intransitivo

Tab. 9 – Tipologie di sistemi secondo la teoria ergodica
Tab. 9 – *Classification of systems on the base of ergodic theory*

Sistema transitivo (ergodico)	Qualunque stato iniziale conduce allo stesso stato finale
Sistema intransitivo	Abbiamo due o più stati finali di cui uno è generato da un gruppo di stati iniziali, uno è generato da un altro gruppo di stati iniziali e così via.
Sistema quasi intransitivo	Abbiamo svariati stati finali generati a partire da diversi stati iniziali attraverso un lungo ma finito periodo di tempo.

- la teoria della biforcazione (Guckenheimer and Holmes, 1983);
- la teoria ergodica dei sistemi dinamici (Eckmann and Ruelle, 1985).

La teoria della biforcazione permette di seguire, attraverso successive biforcazioni calcolate analiticamente o numericamente, il comportamento di un sistema dalle soluzioni più semplici a quelle più complesse, da un singolo equilibrio attraverso equilibri multipli e fino a soluzioni periodiche, caotiche e pienamente turbolente. Si osservi tuttavia che le biforcazioni possono essere calcolate analiticamente solo per stati stazionari (punti fissi, nel linguaggio della teoria), per soluzioni periodiche (cicli limite nello stesso linguaggio), e per sistemi relativamente semplici (Charney and DeVore, 1979; North *et al.*, 1981; Jin and Ghil, 1990).

Le transizioni a comportamenti più complessi, quasi-periodici, caotici o pienamente turbolenti, richiedono un'indagine numerica. Inoltre anche le transizioni verso equilibri multipli e verso soluzioni periodiche richiedono calcoli numerici in modelli più realistici e dettagliati (Strong *et al.*, 1995).

La teoria ergodica, branca della matematica nata dalle investigazioni in meccanica statistica, si riferisce al comportamento medio a lungo termine dei sistemi dinamici. Secondo tale teoria i sistemi possono essere ricondotti alle tre categorie dei sistemi transitivi (o ergodici), intransitivi e quasi intransitivi (tabella 9); il sistema climatico appartiene a quest'ultima categoria (Lorenz, 1963, 1976, 1990). Se i sistemi transitivi presentano uno stato finale stabile e unico, i sistemi quasi intransitivi presentano nel corso della loro evoluzione periodi finiti durante cui prevalgono diversi stati, che nel caso del clima sono detti regimi (Lockwood, 2001).

Nel caso del clima la condizione di quasi intransitività, frutto della presenza di feed-back interni e di instabilità che coinvolgono le diverse componenti del sistema, produce alcuni importanti limitazioni alle nostre possibilità conoscitive come ad esempio l'impossibilità di definire una singola condizione finale in grado di descrivere in modo realistico il clima.

In molti sistemi (in particolare quelli caotici) solo le quantità medie sono importanti poiché le traiettorie individuali non possono essere ricavate in modo minimamente accurato. Caso classico è quello di un gas, in cui pressione e temperatura sono conseguenza delle traietto-

rie individuali delle molecole. La teoria ergodica dei sistemi dinamici offre modelli statistici per descrivere l'evoluzione climatica nello spazio e nel tempo. Tale tipo di statistiche non lineari consentono di valutare sistematicamente in quale misura le soluzioni di modelli climatici complessi si avvicinino a quelle ottenute con semplici e più facilmente comprensibili modelli o a quelle riflesse dalle osservazioni esistenti (Ghil, 1995).

Lockwood (2001) ha mostrato un paragone fra l'atmosfera ed sistemi caotici relativamente semplici quali le sequenze di Feigenbaum ovvero con comportamenti caotici più complessi quali quelli osservati nella chimica inorganica nel caso dell'ossidazione di un acido organico ad opera del bromato di potassio in presenza di un catalizzatore idoneo (reazione di Belousov – Zhabotinsky).

Si osservi inoltre che, secondo la legge dei grandi numeri (Lockwood, 2001), un sistema altamente non lineare, dissipativo e in condizioni di non equilibrio, finché non diviene sufficientemente grande presenta una chiara distinzione fra valori medi e fluttuazioni e queste ultime possono essere trascurate.

Tuttavia in processi non in equilibrio le fluttuazioni possono determinare il risultato globale (passando da semplici correttori dei valori medi a modificatori dei valori medi stessi). In particolare, nell'evoluzione del sistema, può essere raggiunto un punto di biforcazione in cui:

- le fluttuazioni divengono anomalmente alte
- il sistema è chiamato a "scegliere" fra vari regimi.

Le fluttuazioni possono altresì giungere a valori dell'ordine dei valori medi, per cui cade la distinzione fra valori medi e fluttuazioni.

Nel sistema in condizioni di non equilibrio, eventi locali hanno ripercussioni sull'intero sistema con correlazioni a grande scala che compaiono al punto di transizione da condizioni di equilibrio a condizioni di non equilibrio (Lockwood, 2001). L'ampiezza di tali correlazioni a grande scala (long range correlations) è inizialmente ridotta ma si amplia con la distanza dall'equilibrio, per giungere ad essere infinita ai punti di biforcazione. Tali correlazioni di grande scala sono state a più riprese osservate dai fisici dell'atmosfera e sono note con il nome di teleconnessioni. La loro entità manifesta un sensibile variabilità temporale, come dimostrato nel caso della correlazione fra i monsoni e sette loro predittori (Krishna Kumar *et al.*, 1995) e nel caso della correlazione fra NAO e regimi circolatori eurasiatici. In quest'ultimo caso, Luterbacher (1999) ha mostrato che la circolazione eurasiatica può risultare temporaneamente disaccoppiata dal NAO.

Pur non essendo lo scopo di questo lavoro quello di approfondire la natura degli stati caotici non lineari propri dell'atmosfera si deve sottolineare che il sistema climatico è un sistema non lineare spesso lontano dall'equilibrio il che comporta le seguenti conseguenze:

- la possibilità di vari regimi climatici complessi con improvvisi salti (transizioni) da un regime all'altro;
- la presenza di rapide e forti variazioni nella variabilità climatica su periodi dell'ordine della decade o meno;

- la persistenza per periodi anche prolungati (fino alle decadi) di eventi climatici estremi quali le siccità.

Tali evidenze sollecitano una modellistica che sia in grado di rendere conto di tali fenomeni tanto in sede diagnostica che prognostica.

Nel sistema climatico, esistono due tipi di problemi di prevedibilità (Lorenz, 1975):

- un problema di prevedibilità di primo tipo e cioè di previsione dell'evoluzione dell'atmosfera a partire da condizioni di partenza date (è essenzialmente un problema di condizioni iniziali);
- un problema di prevedibilità di secondo tipo e cioè di previsione dell'evoluzione dell'atmosfera in funzione del comportamento delle forzanti esterne (è essenzialmente un problema di condizioni al contorno).

I sostenitori dell'efficacia delle previsioni climatiche (vedi capitolo successivo) ritengono che i modelli di simulazione dinamica (GCM) si collochino al di fuori dai limiti imposti dalla prevedibilità di primo tipo. Tuttavia le componenti più lente del sistema climatico (es: oceani, biosfera, criosfera) hanno un comportamento tale da far sentire l'effetto delle loro condizioni iniziali anche decenni in avanti nel tempo, rappresentando per così dire la memoria lunga del sistema (Pielke, 1999; Giorgi, 2005).

Bibliografia

- Charne, J. G., J. G. DeVore 1979. *Multiple flow equilibria in the atmosphere and blocking*. J. Atmos. Sci., 36, 1205–1216.
- Eckmann J.-P., D. Ruelle 1985. *Ergodic theory of chaos and strange attractors*. Rev. Mod. Phys., 57, 617–656 (addendum, Rev. Mod. Phys., 57, 1115, 1985).
- Ghil M., K. C. Mo 1991. *Intraseasonal oscillations in the global atmosphere. Part I: Northern Hemisphere and tropics*. J. Atmos. Sci., 48, 752–779.
- Ghil M. 1995. *Atmospheric Modeling, in Natural Climate Variability on Decade-to-Century Time Scales*, D.G. Martinson, K. Bryan, M. Ghil, M.D. Hall, T.R. Karl, E.S.
- Ghil M., Robertson A.W., 2000. *Solving problems with GCMs: General Circulation Models and their role in the climate modeling hierarchy*. In *General Circulation Model Development: Past, Present, and Future (Arakawa Festschrift)*, D. Randall (Ed.), Academic Press, pp. 285–325.
- Guckenheimer J., Holmes P. 1983. *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems and Bifurcations of Vector Fields*, Springer-Verlag, New York, 453 pp.
- Jin F.-F., M. Ghil 1990. *Intraseasonal oscillations in the extratropics: Hopf bifurcation and topographic instabilities*. J. Atmos. Sci., 47, 3007–3022.
- Krishna Kumar K., Soman MK., Rupa Kumar K. 1995. *Seasonal forecasting of Indian summer monsoon rainfall*. Weather 50: 449–467.
- Lockwood J.G., 2002. *Abrupt and sudden climatic transitions and fluctuations; a review*, Int. J. Climatol., 21, pp. 1153–1179
- Lorenz E. N. 1963a. *Deterministic nonperiodic flow*. J. Atmos. Sci., 20, 130–141.
- Lorenz E. N. 1963b. *The mechanics of vacillation*. J. Atmos. Sci., 20, 448–464.
- Lorenz E.N. 1964. *The problem of deducing the climate from the governing equations*. Tellus, 16, 1–11.
- Lorenz E.N., 1975. *Climate predictability: the physical basis of climate modelling*. WMO, GARP, publ.ser., 16, 132–136.
- Luterbacher J., Schmutz C., Gyalistras D., Xoplaki E., Wanner H. 1999. *Reconstruction of monthly NAO and EU indices back to AD 1675*. Geophysical Research Letters 26: 2745–2748.
- North G. R., R. F. Cahalan, J. A. Coakley, Jr. (1981). *Energy balance climate models*. Rev. Geophys. Space Phys., 19, 91–121.
- Peixoto J.P., Oort A.H., 1992. *Physics of climate*, American Institute of Physics, New York, 520 pp.

Pielke R.A., Liston G.E., Lu L., 1999. *Climate prediction as an initial value problem*, Proceedings, 14th Conference on Hydrology, 79th AMS Annual Meeting, 10–15 Jan. 1999. Dallas, Texas, 357–60.

Strong, C. M., F.-F. Jin, M. Ghil 1995. *Intraseasonal oscillations in a barotropic model with annual cycle, and their predictability*. J. Atmos. Sci., 52, 2627–2642.

8. I modelli climatici

Fin dalle sue origini la modellistica matematica applicata al clima costituisce un elemento oggetto di dibattiti anche accesi; ciò in virtù del fatto che la climatologia opera con riferimento a fenomeni che non sono studiabili in laboratorio (se non limitatamente a piccoli esperimenti a scala ridotta) e che pertanto sfuggono a quel controllo che altre scienze sperimentali possono mettere in atto grazie alla riproducibilità degli esperimenti condotti.

L'impossibilità di ripetere esperimenti che possano condurre ad una spiegazione fisica circa l'origine, l'evoluzione e l'esaurimento dei fenomeni atmosferici (es: un cumulonembo, un sistema frontale) impone l'utilizzo di un livello d'inferenza sconosciuto ad altri settori. A sopperire a questa oggettiva mancanza è stata spesso chiamata la modellistica matematica, utilizzata non solo come si fa comunemente, ovvero per fornire una descrizione generalizzante di un andamento supportato da dati sperimentali, ma cercando in essa funzioni diagnostiche e prognostiche molto spinte ed in grado di sopperire ad una base di dati scarsa.

In tale quadro ha poi agito la stretta parentela tra meteorologia e climatologia che ha spesso condotto a mutuare gli strumenti dell'una nell'altra, tanto che oggi si tende a confondere le due discipline in un "unicum" non solo metodologico ma anche teorico. Bisogna invece ricordare che la meteorologia, che si caratterizza per una forte componente prognostica (l'utilità della disciplina si fonda proprio su questo), prende le mosse dalle equazioni di Navier-Stokes che, anche nella limitatezza delle soluzioni approssimate, restano equazioni descrittive di un fenomeno fluido-dinamico, ovviamente molto complesso, qual'è il tempo atmosferico attuale.

La climatologia nasce invece come scienza statistica e, pur riferendosi all'insieme delle variabili del tempo meteorologico, è chiamata ad interpretare i fenomeni dovendo avere a disposizione lunghe serie temporali di dati che siano definibili in termini di "campione congruo" dell'universo analizzato (McGregor, 2006).

Se si accetta questa seppur grossolana distinzione teorica tra le due discipline, allora si capisce che uno dei problemi fondamentali della modellistica climatica è rappresentato dall'impossibilità di utilizzare proprio un approccio statistico per difficoltà computazionali derivanti dalla complessità del sistema da un lato e dalla limitatezza dei dati dall'altro (Marshall Inst., 2004). La via seguita da alcuni climatologi è stata dunque quella di adottare una rappresentazione matematica del sistema attraverso le equazioni descrittive dei processi individuali e la loro simultanea soluzione spazio-temporale.

8.1 Una tassonomia dei modelli

I modelli impiegati per la simulazione climatica sono oggi in numero relativamente elevato (grossomodo fra 20 e 30 sono solo quelli di utilizzo più comune). Una classificazione dei modelli climatici esistenti può essere

fondata da un lato sulla scala spazio-temporale che il singolo modello è in grado di risolvere e dall'altro sullo schema fisico, ovvero sull'insieme delle parametrizzazioni, che sostiene il modello.

In base a tali criteri è possibile definire i seguenti tipi di modelli:

- modelli atmosferici monodimensionali radiativi-convettivi;
- modelli oceanici diffusivi monodimensionali;
- modelli a bilancio energetico monodimensionali;
- modelli bidimensionali atmosfera-oceano;
- modelli tridimensionali atmosferici (AGCM);
- modelli tridimensionali di circolazione generale accoppiati atmosfera-oceano (AOGCM).

Altro elemento caratteristico dei diversi modelli è costituito, a livello di output, dalla "sensibilità" climatica ovvero dall'incremento di temperatura previsto per un raddoppio di concentrazione dei cosiddetti composti climoalteranti; a tale proposito il tasso di variazione fornito dallo schema modellistico IPCC è tra 1°C e 5°C.

Altri elementi necessari a definire le diverse categorie di modelli sono il numero di dimensioni spaziali, i processi fisici esplicitamente rappresentati, il livello a cui si spingono nel riprodurre i processi tipici del sistema climatico tramite parametrizzazioni ed il "costo di funzionamento" in termini di risorse di calcolo (IPCC, 1997).

In particolare, in base alla capacità del modello di rappresentare in forma esplicita i diversi comparti che compongono del sistema climatico (ovvero atmosfera, superficie e oceano) ed in base alla "robustezza" di tali rappresentazioni ed alla loro capacità a simulare le interazioni reciproche, il modello fornirà previsioni più o meno equilibrate. Abbiamo utilizzato il termine equilibrato in quanto le previsioni climatiche di lunga durata non possono essere definite esatte fin quando non si confrontano con la realtà e dunque quello che si ricerca quando si "gira" un modello è la "dote di stabilità" del modello stesso, la quale rappresenta in fondo un grado di equilibrio impedendo che i risultati tendano a divergere.

La stabilità viene quindi imposta aprioristicamente al modello sulla base di serie di dati ritenute affidabili e che devono essere verosimilmente riprodotte dal modello una volta imposte le condizioni iniziali (fase di inializzazione) e lanciato il programma computazionale.

8.2 Gli AOGCM

Gli AOGCM sono i modelli climatici più complessi oggi disponibili poiché tentano di rappresentare tutti i sottosistemi (atmosfera terre emerse e oceano) e le relative interazioni, cercando in particolare di modellare esplicitamente (i) il transfer radiativo atmosferico attraverso la parametrizzazione di nubi, vapore acqueo e altri componenti minoritari, (ii) la criosfera mediante la parametrizzazione delle precipitazioni solide e del ghiaccio marino e (iii) il trasporto di calore e acqua dall'oceano all'atmosfera e viceversa.

Come tuttavia ben sa chi si occupa di modellistica matematica, non sempre il modello più complesso è quello più adeguato allo scopo che ci si prefigge (Monteith, 1996). Inoltre la complessità, l'elevato numero dei pro-

cessi coinvolti, la necessità di operare a scala globale e la necessità di fornire gli output in tempi ragionevoli impongono a tali modelli un dettaglio spaziale relativamente grossolano (il pixel tipico è di qualche centinaio di chilometri), per cui l'immagine del sistema che gli AOGCM forniscono non può essere che una rappresentazione a grande scala (Mariani, 2005).

Avendo la loro dinamica principale legata alla circolazione, anche nel caso della climatologia le pesanti approssimazioni effettuate in termini di orografia e di spazializzazione dei dati affliggono pesantemente gli AOGCMs. In particolare, il "clock" di un modello accoppiato viene fornito dalla propagazione dell'onda baroclinica di Rossby e la struttura verticale dell'atmosfera è fondamentale per determinare la forzante che determina l'accoppiamento (Goodman e Marshall, 1999). Chiaramente le nubi possono alterare pesantemente lo scambio radiativo e conseguentemente anche la struttura termica verticale determinando una scarsa sensibilità del modello alle condizioni reali. Ciò nonostante è curioso assistere al proliferare dell'applicazione di tecniche di "downscaling statistico" degli scenari offerti da questi modelli per cercare di rappresentare l'andamento climatico in areali molto piccoli e spesso situati in zone orograficamente complesse (Giorgi, 2004), senza considerare che il downscaling, con le sue fonti di errore legate ad esempio alla necessità di risolvere fenomeni a meso e microscala, è una enorme fonte di errori che vanno ad aggiungersi a quelli già gravosi dei GCM globali (un problema analogo si riscontra nella descrizione della convezione nei modelli ad area limitata, che può condurre a errori nella stima della precipitazione più gravi di quelli compiuti dai modelli globali).

La comunità scientifica ha sempre inteso il termine "validazione" come test di un modello su un set di misure indipendenti rispetto a quelle su cui il modello stesso è stato calibrato. A tale riguardo ci paiono assai efficaci le seguenti considerazioni di sintesi sviluppate da Refsgaard et Henriksen (2004): *"benché l'esperienza mostri che i modelli funzionano generalmente peggio in test di validazione su dati indipendenti di quanto non facciano sui test di calibrazione, la validazione dei modelli è per nostra esperienza una attività alquanto trascurata, sia nelle linee guida di modellistica sia nella letteratura scientifica. E' possibile che alcuni ricercatori non amino il termine validazione per questioni di filosofia della scienza; tuttavia molti scienziati non sostengono la necessità della validazione dei modelli e, fra le conseguenze di questa mancanza d'interesse è che pochissimo lavoro è stato dedicato allo sviluppo di schemi di test di validazione."* Tali affermazioni si riferiscono ad un ambito, l'idrologia, tutt'altro che marginale rispetto alla climatologia.

Volendo valorizzare un approccio in termini di validazione si potrebbe ad esempio pensare di calibrare un modello su dati del periodo 1951-1980 e di validarlo su dati del periodo 1981-2000. Ciò non si verifica invece nel caso dei GCM per i quali viene di norma seguito il seguente tracciato:

- esecuzione di una run di controllo su un periodo per il quale si dispone di dati osservativi adeguati e rispetto al quale i modelli vengono "tarati" in modo da descriverne adeguatamente il comportamento;

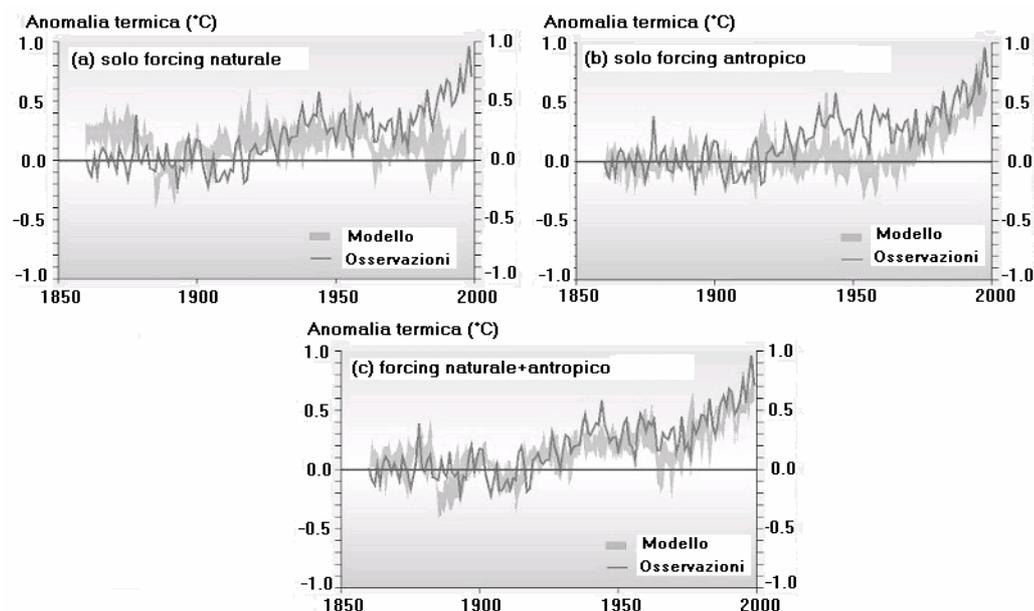


Fig. 21 – Aumento delle temperature dal 1860 al 2000; valori osservati e simulati (fonte IPCC).

Fig. 21 – Increase of temperature for period 1860–2000; observed and simulated values (form IPCC).

- esecuzione della previsione, con i modelli tarati che vengono lanciati in avanti su periodi dell'ordine dei decenni o dei secoli.

Da segnalare poi che in alcuni casi è entrato nell'uso comune il test di nuove parametrizzazioni di modelli (o di nuovi modelli) per confronto con i risultati ottenuti dai modelli IPCC. La validazione di modelli tramite modelli è a nostro avviso la strada maestra verso nuove metafisiche e cioè verso una autoreferenzialità che andrebbe a sostituirsi al costante confronto con la realtà che è il vero cardine della scienza sperimentale (Galilei, 1623).

Alcuni modelli si riferiscono esplicitamente alla produzione di scenari in termini di concentrazione di CO₂. I risultati di questi modelli vengono talvolta utilizzati per dimostrare che effettivamente è questo componente atmosferico la causa principale dell'aumento di temperatu-

ra (figura 21). Se da un punto di vista rigorosamente speculativo ciò non è dimostrabile, è oltremodo fuorviante dire che il modello mostra una seppur limitata veridicità dell'argomento. Infatti, senza volersi sbilanciare a favore di una ipotesi o di un'altra, si deve chiaramente rimarcare che i modelli vengono "tarati" opportunamente su una serie di dati che rappresentano la "verità" ovvero la funzione di governo della stabilità del modello. Se si è dunque deciso che il modello è stabile con un determinato funzionale, il modello altro non potrà fare che continuare a rappresentare questo funzionale pena la divergenza e quindi l'arresto del modello stesso. Quindi se si è supposto che l'aumento di temperatura sia generato dalla CO₂, il modello altro non potrà fare che confermare tale presupposto.

E' quindi del tutto ingannevole affermare che i dati confermano la veridicità del modello, in quanto il modello è stato costruito proprio su quei dati.

Sul significato di "affidabilità" dei risultati, e sul possibile utilizzo per fini politici di questi, può rivelarsi utile la lettura di un'articolo di Bray e von Storch (1999) che fornisce alcuni chiarimenti sull'interpretazione socio-scientifica dei risultati dei modelli. Da tale lavoro emerge che la rappresentazione dei diversi processi nei modelli è funzione del miglior compromesso tra quanto si può calcolare ed il tempo necessario a farlo, unito alla capacità di rappresentare quello che avviene alla luce delle attuali conoscenze scientifiche. Purtroppo, spesso e volentieri, le nostre rappresentazioni sono così rozze da dovere ammettere che i margini di errore superano la significatività del risultato.

L'analisi di 104 modelli climatici, di diversa complessità, ha fornito interessanti risultati relativi alla loro affidabilità (Tabella 10)

Si noti che, come descritto in altra parte di questo articolo, le nubi rappresentano la principale incognita non solo in termini di descrizione dei processi ma anche direttamente a livello di validazione della modellistica. Si pensi che per validare un modello occorrono misure e la variabilità di scala della copertura nuvolosa impedisce di otte-

Tab. 10 – Affidabilità delle modellizzazioni da parte degli AOGCM in relazione ad alcune componenti del sistema climatico (adattato da Bray e von Storch, 1999).

Tab. 10 – Reliability of AOGCM modelisation for some different components of climatic system (adapted from Bay and von Storch, 1999)

Elemento modellizzato	Finezza della modellizzazione	
	Buona o molto buona	Inadeguata
Nubi	3%	97%
Vapore acqueo	3%	97%
Radiazione	25%	75%
Dinamica dell'acqua in atmosfera	43%	57%
Convezione	2%	98%
Trasporto del calore	2%	98%
Idrodinamica oceanica	37%	63%

nera stime ragionevoli del comportamento della modellistica in quanto quest'ultima deve assumere degli indici di copertura del tutto fittizi, e talvolta non giustificati, a causa dell'ampia scala spaziale utilizzata.

Si pensi che non sono del tutto chiarite neppure le parametrizzazioni che regolano la formazione di coperture nuvolose di diversa tipologia e questo si riflette in modo drammatico sull'attendibilità dei risultati della modellistica in quanto la tipologia delle nubi influenza direttamente il forcing radiativo superficiale facendolo ad esempio passare da positivo a negativo. In realtà una parte della comunità scientifica sta operando proprio ai fini della risoluzione di questa problematica ma per ottenere un risultato saranno necessari ancora molti sforzi sperimentali e diversi anni di lavoro.

Un pesante critica ai risultati dei modelli viene da un altro recente lavoro di Thorne *et al.* (2005) dove le incertezze osservative sono indicate quale pesante fardello che di fatto può attualmente impedire una ragionevole qualità di previsione modellistica.

Stephens (2005) analizza puntualmente la diversa sensibilità dei modelli in funzione dei feedback prodotti dalle nubi: nella review viene chiaramente indicato come l'assunzione di un particolare sistema climatico, inteso come insieme di variabili dipendenti, sia critico per la definizione dei feedback, delle loro interazioni e per definire le performance del modello. Secondo l'autore uno degli step più critici è quello relativo alla comprensione delle interrelazioni fra i diversi tipi di feedback, che in generale non possono essere assunte come lineari.

Se si eccettua il risultato relativo all'aumento di temperatura previsto dai modelli, ma in realtà parte integrante della costruzione dei modelli stessi, le altre previsioni offerte dai modelli non paiono per ora suffragate dalle osservazioni sperimentali. In particolare, Artide ed Antartide non stanno mostrando evidenze di riscaldamento o almeno non lo stanno facendo su tutto il territorio e neppure ai tassi previsti (Leroux, 2004).

Ad esempio Chylek *et al.* (2003) evidenziano che le temperature dell'aria in Groenlandia, dopo una fase di ri-

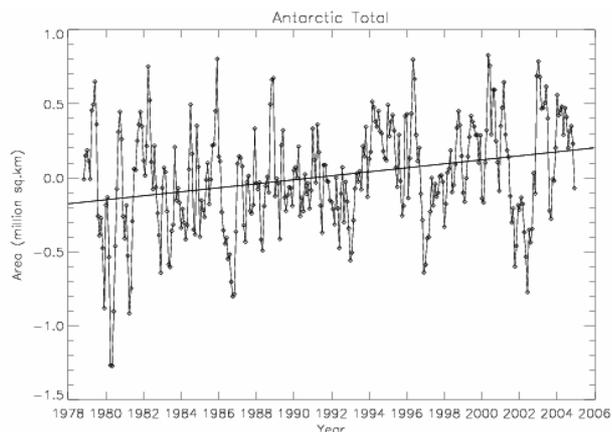


Fig. 22 – Anomalia delle superfici ghiacciate in Antartide per il periodo 1978-2005 (NSIDC, 2006)

Fig. 22 - Antarctic Sea Ice Area Anomalies, 1978-2005, (NSIDC, 2006)

scaldamento protrattasi fino al 1940, stanno oggi vivendo un progressivo raffreddamento tant'è vero che dall'inizio delle misure (anno 1987), le temperature della parte centrale dell'isola manifestano un calo di circa 2.2°C per decade. Analoghi fenomeni sono segnalati per l'Antartide, ove le misure da satellite indicano che al riscaldamento della parte Ovest fa riscontro il raffreddamento della parte est del continente (Schneider *et al.*, 2004) mentre altre misure da satellite mostrano un graduale incremento della superficie complessiva del ghiaccio (figura 22). Tali dati sono in palese contrasto sia con le previsioni dei modelli sia con le affermazioni dell'IPCC (2001), secondo cui "Il cambiamento climatico nelle regioni polari è atteso essere fra i più forti e rapidi a livello globale e causerà i più forti impatti fisici, ecologici, sociologici ed economici specialmente in Artide, penisola antartica e oceanici australi. Le regioni polari contengono importanti drivers del cambiamento climatico, per cui, una volta innescati, i loro effetti si manifesteranno per secoli, anche molto dopo che le concentrazioni di CO₂ si saranno sta-

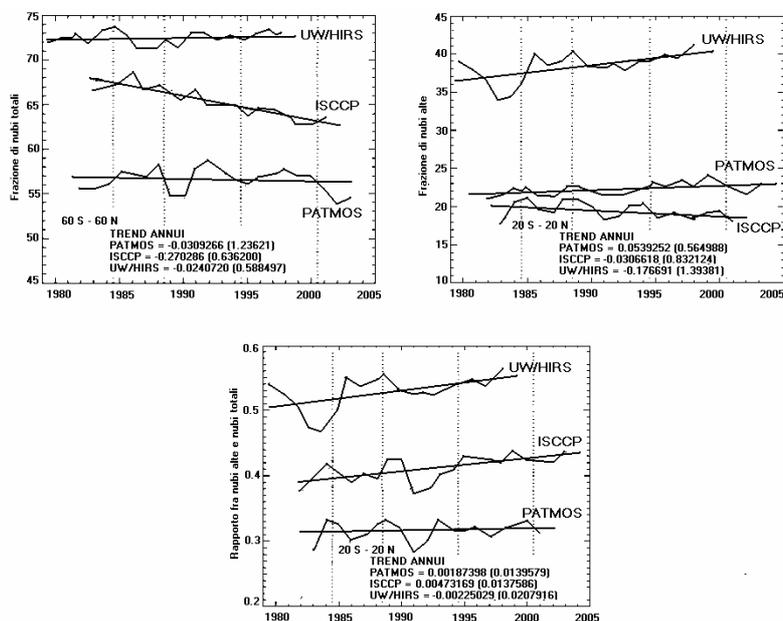


Fig. 23 - Da Heidinger et al 2004 – comparazione tra i diversi data set (pubblicazione disponibile in rete all'indirizzo: <http://www.ssec.wisc.edu/~heidinger/lectures.html>). I tre trend corrispondono a eguali prodotti (copertura nubi) di diversi progetti climatologici afferenti a varie istituzioni

Fig. 23 – From Heidinger et al 2004 – comparison among some different data sets (<http://www.ssec.wisc.edu/~heidinger/lectures.html>). The three different trends correspond to same products (cloud coverage) of different climatological projects belonging to different Institutions

bilizzate, e causeranno impatti irreversibili su coltri glaciali, circolazione oceanica globale e innalzamento del livello marino.”

Sempre a livello di profezie si deve aggiungere che la copertura nuvolosa, stimata in diminuzione, sembra dare chiari segnali di crescita (Heidinger et. al.,2004; Wylie et al., 2005) (figura 23 bc) mentre l'aumento di uragani previsto per questi anni sembra invece avere dimostrato una tendenza, statisticamente irrilevante, al declino, anche se si ipotizza un loro aumento in potenza distruttrice (Emanuel, 2005).

Le discrepanze emerse tra le previsioni dei modelli contenute nel secondo rapporto IPCC hanno costretto di fatto la stessa istituzione a rivedere lo stato delle conoscenze. La risposta è stata purtroppo prevalentemente politica in quanto anziché mettere in discussione gli aspetti scientifici del problema si è utilizzata una formula “pilatesca” dove si abusa dei condizionali (IPCC, 2001).

Recentemente Giorgios Amanatidis, stimato Science Officer alla Commissione Europea, ha dichiarato: “Siamo ancora in attesa di ottenere quanto promesso e cioè modelli climatici regionali in grado di fornire previsioni atte ad orientare le scelte politiche”. Sempre in tema di citazioni, Kirill Kondratyev, uno dei massimi esperti mondiali di radiazione atmosferica al quale si devono studi fondamentali sul bilancio radiativo utilizzati nei modelli, un po' meno “politically correct” ha detto: “E' mia opinione che le sole persone che risentiranno di un eventuale abbandono del protocollo di Kyoto saranno le diverse

migliaia di ricercatori che abitualmente frequentano, in località attraenti, conferenze sul riscaldamento globale”, volendo rimarcare il suo dubbio profondo sulle previsioni modellistiche.

Anche se l'ultima dichiarazione appare “molto forte”, esprime il disappunto della comunità sperimentale, la quale può accedere ai media con grande difficoltà e, a causa di ciò, si vede sovente precluse quelle possibilità di finanziamento che non sono invece negate alla modellistica, la quale peraltro non potrebbe operare senza la disponibilità di dati sperimentali.

In figura 24 è riportato l'esempio di un “run” di diversi modelli effettuato con riferimento all'indice NAO (North Atlantic Oscillation) riferito al periodo invernale, indice che è strettamente correlato con il clima dell'area euro-asiatica alle medie latitudini. Si può vedere come, pur essendo abbastanza congrui nei pattern generali, i diversi modelli forniscano strutture molto differenziate se si focalizza la nostra attenzione sull'area euro-mediterranea. Ciò si traduce nella pratica impossibilità di esprimere giudizi su quel che avviene in ambienti come le medie latitudini, ove l'orografia ed i fenomeni di mesoscala giocano un ruolo cruciale. In altri termini, nelle simulazioni presentate i fenomeni che sono la vita e la ricchezza della nostra meteorologia (ciclone di Genova, foehn, depressioni dello Ionio, depressioni africane, anticicloni africani, ecc.) spariscono irrimediabilmente. La conseguenza è che per un areale delle dimensioni dell'Italia l'insieme delle informazioni ottenibili può for-

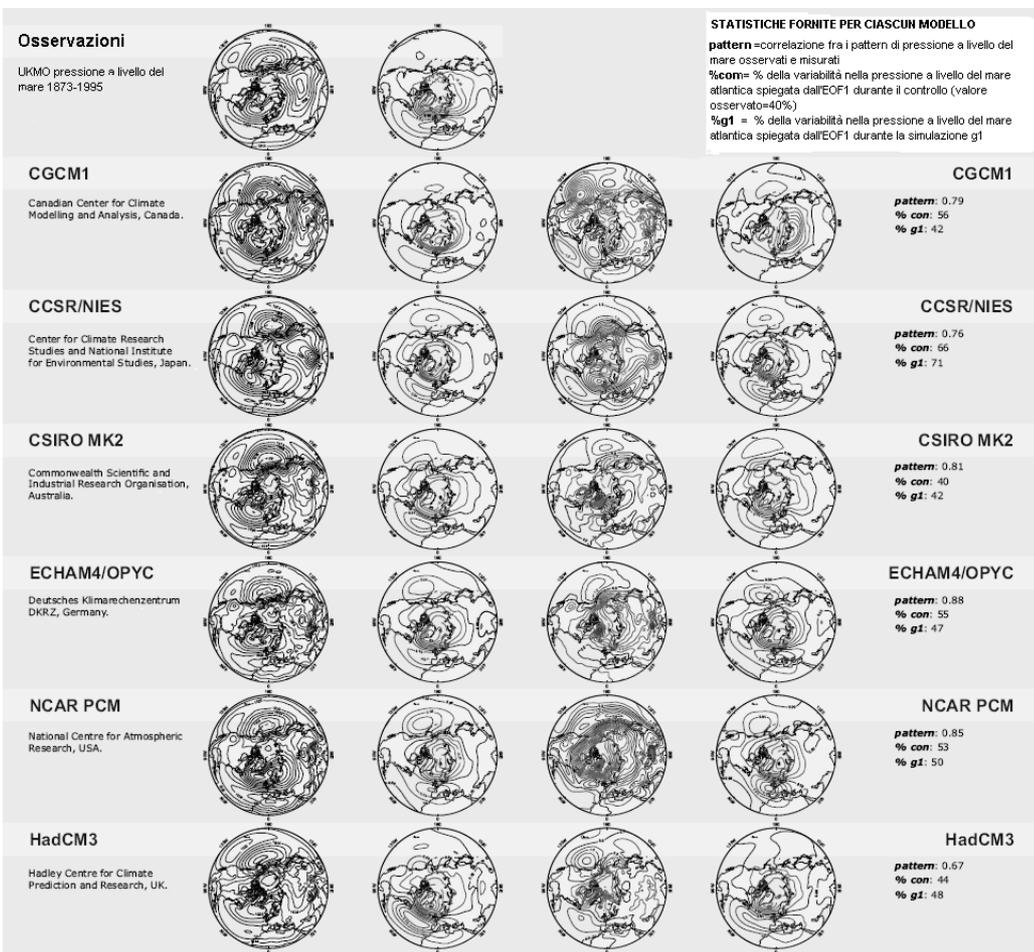


Fig. 24 - Confronto tra alcuni modelli fra i più utilizzati in relazione alla simulazione dell'indice NAO (Osborn e Jones, 2000).

Fig. 24 - Comparison of simulations of NAO index obtained with some models (Osborn e Jones, 2000).

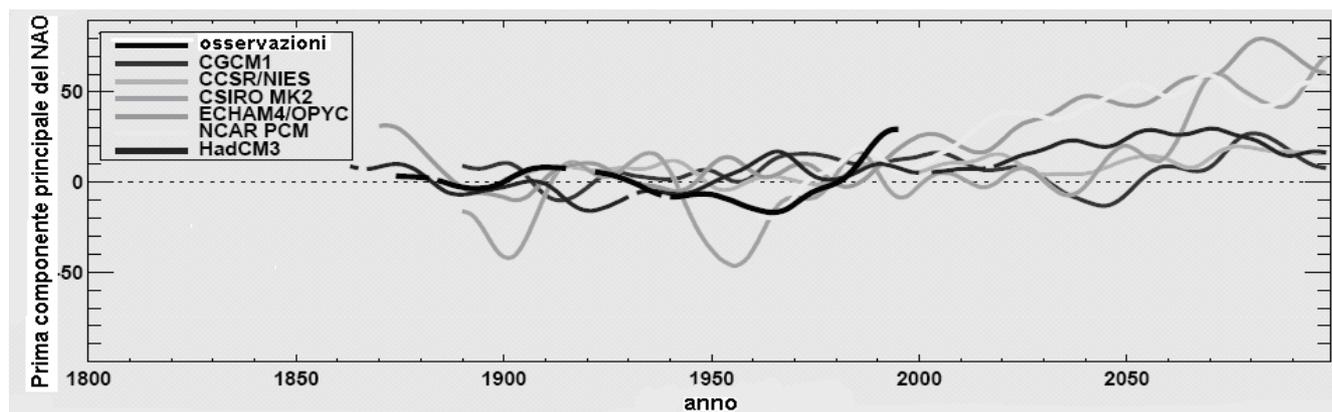


Fig. 25 – Andamento della prima componente principale del NAO da dati osservati e simulati con gli stessi modelli di cui alla figura 23 (Osborn e Jones, 2000).

Fig. 25 – First PC of NAO observed and simulated with models shown in figure 23 (Osborn e Jones, 2000).

nire ben poche indicazioni utili a fini pratici, ad esempio per la corretta gestione del territorio e delle risorse idriche. La debolezza dei modelli nel descrivere l'andamento temperale del NAO invernale viene evidenziata dal diagramma in figura 25 sempre tratto da Osborn e Jones (2000).

La debolezza dei GCM si manifesta anche nei confronti di ENSO (El Niño Southern Oscillation) e della QBO (Quasi Biennial Oscillation), ciclicità fondamentali per il sistema climatico, come evidenziato da Santer *et al.* (2005). L'articolo in questione è particolarmente interessante in quanto sviluppa un ulteriore confronto fra dati da satellite, da sonde e da modelli. I risultati prodotti non sembrano potere scrivere una parola definitiva sul problema climatico. Oltre a consigliarne la lettura per completezza scientifica, si devono segnalare le conclusioni, in cui si sottolinea ancora una volta il pericolo insito nei confronti fra le suddette categorie di dati senza aver sufficientemente tenuto in considerazione le incertezze intrinseche in ciascuna categoria.

La critica proposta in questo lavoro non deve essere fraintesa: non si dubita, infatti, della necessità dell'utilizzo dei modelli come strumento per la rappresentazione della realtà fisica. Il problema attuale principale è che il settore climatico, molto più che altre discipline, è pervaso da influenze esterne all'ambito della scienza e talvolta esiste una pressione generata dalla 'consensus science' che si traduce in un abbassamento del livello di guardia, che caratterizza ogni buon ricercatore, per pervenire comunque a un risultato che va al di là delle obiettive limitazioni degli strumenti scientifici a disposizione. Si vedono quindi circolare delle simulazioni generate con supposte precisioni ottenute senza considerare la limitatezza delle parametrizzazioni e delle precisioni strumentali a disposizione. Una rassegna divulgativa delle applicazioni dei modelli, così come del problema dei feed-back, è riportata nel libro di Cotton e Pielke (1995).

GCM: è possibile ricomporre la diatriba fra fautori e detrattori?

Quella fra sostenitori e detrattori dei modelli di simulazione dinamica applicati al clima è una polemica difficile da dirimere, in quanto solo il tempo ci dirà chi ha avuto ragione e se ha avuto ragione per motivi giusti o sbagliati (Pielke & Pielke, 2006).

Per il momento vogliamo sottolineare come temi aperti ed in precedenza discussi i seguenti:

- il tema della validazione dei modelli, problema irrilevante per i fautori, problema chiave per i detrattori;
- il tema della sensibilità dei modelli alle condizioni iniziali, falso problema per gli uni e elemento critico per gli altri;
- il tema del grado di realismo con cui si è oggi in grado di descrivere i diversi sottosistemi che compongono il sistema climatico, sufficiente per i fautori e inadeguato per i detrattori.

Su tali temi esistono opinioni del tutto divergenti fra i fautori ed i detrattori della modellistica di simulazione applicata a previsioni che si spingono in avanti decenni rispetto all'attualità.

Come ricomporre questa diatriba, ammesso che sia possibile e utile farlo?

Certamente non invocando ad arbitro la maggioranza della comunità scientifica, in quanto la scienza per sua natura non è un gioco di maggioranze. Su tale tema vogliamo citare la seguente frase del Saggiatore di Galileo (1623), che notoriamente non fu mai uomo da stare nelle maggioranze: "Se il discorrere circa un problema difficile fosse come il portar pesi, dove molti cavalli porteranno più sacca di grano che un caval solo, io acconsentirei che i molti discorsi fossero più che un solo; ma il discorso è come il correre, e non come il portare, ed un cavallo barbero solo correrà più che cento frisoni". Non ce ne vogliano i frisoni ma noi amiamo molto più i "barberi".

Certamente non portando la disputa su un piano ideologico in cui entrano temi quali la globalizzazione, i divari

nord sud, gli odii mai sopiti per il sistema capitalistico, le utopie arcaicheggianti, le teorie di Gaia e quant'altro.

Certamente non bollando i detrattori come lacchè di questo o di quell'interesse di cui si farebbero mosche cocchiere. Se i detrattori avessero ragione (forse i fautori sono qualche volta sfiorati da questo dubbio) la scienza del clima si sarebbe assunta una responsabilità storica e politica enorme, quella cioè di decidere il percorso futuro delle nostre economie, falsando il gioco con una forzante esterna fondata su argomenti non razionali. Quante iniziative discutibili sul piano ambientale (es: un più intenso sfruttamento di risorse idroelettriche alpine già in gran parte captate, le ipotesi d'impiego come combustibile di residui colturali che necessiterebbero invece di ritornare al terreno per mantenere il tenore di humus, il taglio di boschi attuato con lo scopo di creare nuovi sink per il carbonio, ecc.) vengono oggi intraprese ponendo in premessa "Il protocollo di Kyoto stabilisce...".

Certamente non creando e diffondendo miti (o almeno non evitando che si diffondano) come il mito secondo cui la CO₂ sarebbe l'unico gas serra mentre il vapore acqueo, primo attore dell'effetto serra, viene trascurato.

Una delle principali obiezioni che i fautori fanno ai detrattori è il fatto che gli stessi sono poco presenti su riviste con referee e che in tale ambito non contestano i risultati prodotti dai fautori. Rispetto a ciò vale da un lato il fatto che questa necessità è fortemente contrastata dalla carenza di fondi e dall'altro l'obiezione che Green ha espresso in un suo articolo del 2002: "I was always worried me that simple models of climate do not seem to work well. Experts on numerical models say that this is because the atmosphere is very complicated, and that large numerical models and computers are needed to understand it. I worry because I do not know what they have hidden in those models and the programs that they use. I wonder what I can compare their models with. Not with each other because they belong to a sort of club, where to have a model that disagrees with everyone else's puts you outside. That is not a bad system, unless of course they are all wrong".

Bibliografia

- Bray, D., H. von Storch 1999. *Climate science: an empirical example of postnormal science*. *BAMS*, 80, 439-455.
- Chylek P., Box J. E., Lesins G., 2004. *Global warming and the Greenland ice sheet*, *Climatic Change* 63: 201-221, 2004.
- Cotton, W.R., R.A. Pielke, 1995: *Human impacts on weather and climate*. Cambridge University Press, pp.287.
- G.C. Marshall Institute, 2004. *Climate Issues & questions*. pp.28 (reperibile in rete)
- Emanuel, K., 2005: *Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years*. *Nature*, 436/4, 686-688.
- Galilei G., 1623. *Il sagggiatore* (<http://www.liberliber.it/biblioteca/g/galilei/index.htm>).
- Giorgi, F., 2005. *Climate change prediction*, *Climatic change*, 2005, 73: 239-265.
- Goodman, J. e J. Marshall, 1999: *A model of decadal middle-latitude atmosphere-ocean coupled modes*. *J Climate*, 12, 621-641
- Green J.S.A., 2002. *Reflections on the earth's albedo: a collection of scattered thoughts*, *Weather*, vol. 57, dec. 2002, 431-439.
- Heldinger A.K., Pavolonis M.J., Jelenak A., Goldberg M., Tarpley D., 2004. *Initial Trends in Cloud Amount from the AVHRR Pathfinder Atmospheres Extended (PATMOS-x) Data Set*, *AMS Satellite Oceanography and Meteorology*, Norfolk, Va, September 2004.

- IPCC, 1997. *An introduction to simple climate models used in the IPCC Second Assessment Report*. Technical Paper www.ipcc.ch (reperibile in rete)
- IPCC, 2001. *Third Assessment Report - Climate Change 2001*. www.ipcc.ch (reperibile in rete)
- Leroux M., 2004. *Le rechauffemet climatique est un mythe!*, *Agriculture & environnement*, n. 18, 3-6.
- Mariani L. 2005. *Vent'anni di cambiamento climatico: lettura critica in chiave agrometeorologica*, *Atti del Workshop Ucea-Climagri "Agricoltura e cambiamenti climatici - Analisi, incertezze, controversie, interdipendenze*, Ancona, 27 e 28 giugno 2005, http://www.climagri.it/relazioni_Ancona.htm (reperibile in rete)
- McGregor, G.R., 2006. *Editorial - climatology: its scientific nature and scope*, *Int. J. Climatol.* 26: 1-5 (2006)
- Monteith J.L., 1996. *The quest for balance in crop modeling*, *Agronomy Journal*, 88:695-697.
- National Snow and Ice Data Center (NSIDC), 2006. *Sea Ice trends and Climatologies from SMMR and SSM/I*. http://nsidc.org/data/smmr/ssmi_ancillary/regions/total_antarctic.html#nsidc (reperibile in rete)
- Osborn T.J., Jones P.D., 2000. *What do climate models tell us about the winter North Atlantic Oscillation?* Poster presented at AGU Chapman conference, The North Atlantic Oscillation, Ourense, Spain, November 2000
- Pielke R.A. Sr., Pielke R.A. Jr., 2006. *La climatologia fra scienza e politica*, *Limes*, *Quaderno Speciale 1 - 2006*, Tutti giu' per terra.
- Refsgaard J.C., Henriksen H.J., 2004. *Modelling guidelines - terminology and guiding principles*, *Advances in water resources*, 27 (2004), 71-82.
- Santer B. D., Wigley T. M. L., Mears C., Wentz F. J., Klein S.A., Seidel D.J., Taylor K.E., Thorne P.W., Wehner M.F., Gleckler P.J., Boyle J.S., Collins W.D., Dixon K.W., Doutriaux C., Free M., Fu Q., Hansen J.E., Jones G.S., Ruedy R., Karl T.R., Lanzante J.R., Meehl G.A., Ramaswamy V., Russell G., Schmidt G.A., 2005. *Amplification of Surface Temperature Trends and Variability in the Tropical Atmosphere*, *Science*, 11 August 2005, (10.1126/science.1114867).
- Schneider D.P., Comiso J., Steig E.J., 2004. *Recent Climate Variability in Antarctica from Satellite-Derived Temperature Data*, *Journal of climate*, Vol. 17.
- Stephens, G.L., 2005: *Cloud feedbacks in the climate system: a critical review*. *J. Climate*, 18, 237-273.
- Thorne, P.W., D.E. Parker, J.R. Chirsty e C. A. Mears, 2005. *Uncertainties in climate trends*. *Bull. Am. Met. Soc.*, October, 1437-1442.
- Wylie, D., D.L. Jackson, W.P. Menzel e J.J. Bates, 2005. *Trends in global cloud cover in two decades of HIRS observations*. *J. Climate*, 18, 3021-3031.

9. Le attività sovranazionali organizzate

Le attività condotte dai diversi Paesi nel campo dei cambiamenti climatici sono numerose ed è estremamente difficile poter affermare che si possa dare una panoramica esaustiva dei diversi progetti che vengono condotti a livello nazionale.

In ambito sovranazionale le Nazioni Unite operano nel settore attraverso la United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) ed il più volte citato IPCC. I progetti afferenti all'IPCC sono numerosi e riguardano i diversi comparti del sistema climatico; molti di questi sono focalizzati anche su singoli processi fisico-chimici. Inoltre tramite l'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO) vengono direttamente supportati programmi quale il CLIVAR (Climate variability and Predictability).

Un ulteriore programma sovranazionale è l'IGBP (International Geosphere-Biosphere Program) finanziato dalla International Group of Funding Agencies for Global Change Research (IGFA) ove diverse agenzie nazionali si riconoscono nel comune progetto di ricerca, finanziandolo.

Per quanto riguarda i progetti più importanti relativi ai processi vi è il Climate and Cryosphere (CliC) del World

Climate Research Program (WCRP) afferente all'International Council for Science. Tale programma di ricerca si occupa di tutti i processi che avvengono in presenza di ghiaccio. Si segnala inoltre il BSRN (Baseline Surface Radiation Network) che si occupa di indagini nel campo della radiazione solare; il progetto BSRN è stato recentemente inserito nel Global Climate Observing System a supporto dell'UNFCCC.

Esistono, inoltre, moltissime azioni speciali, a sfondo climatico, intraprese dal WMO in settori specifici quali l'agroclimatologia o la difesa dagli eventi estremi. Queste azioni si pongono quale obiettivo principale il poter fornire risposte concrete, a scala mondiale, a problemi reali. Uno degli esempi più concreti è l'azione 'Techniques for Agroclimatic Characterization and Sustainable Land Management' coordinato dalla dott.ssa Federica Rossi (IBIMET-CNR), e facente parte della Divisione per l'Agrometeorologia del WMO diretta dal dott. M. Shivakumar (WMO Ginevra), che ha recentemente organizzato a Bologna un workshop sull'analisi e sul mapping climatico in agricoltura.

La mappatura agroclimatica e la zonazione sono mezzi di notevole importanza per l'uso sostenibile del suolo, la valorizzazione e il recupero di aree marginali che possono trarre nuova spinta e profitto dalle proprie peculiarità naturali. L'esaltazione del potenziale delle diverse realtà agricole e la loro utilizzazione ottimale richiede lo sforzo combinato di diverse discipline, dall'ecofisiologia alla agronomia alla meteorologia alla fisica dell'atmosfera, con uno spettro di tecniche che si sono enormemente sviluppate negli ultimi decenni. In particolare l'agrometeorologia si pone all'intersezione di queste discipline e può dunque giocare un ruolo unificante e determinante nel promuovere conoscenze di base, applicazioni e progetti a livello sovranazionale, nazionale e locale volti a promuovere un efficiente uso delle risorse, tenendo conto delle limitazioni e dei punti di debolezza delle informazioni a livello locale. Durante i lavori del workshop, si sono valutate le possibilità di utilizzo combinato di nuove tecnologie, come le immagini e i dati da satellite, i sistemi informativi territoriali, la modellistica, nel generare mappe agroclimatiche, comprendendo anche aspetti di vulnerabilità delle colture alla variabilità del clima e di determinazione del rischio. Le presentazioni fatte al convegno saranno presto disponibili in internet.

Un aspetto importante di queste attività è costituito dalla formulazione di raccomandazioni operative: nel caso di questo workshop tra le diverse scaturite è da sottolineare la richiesta di rendere più climatica la base osservativa oggi prevalentemente costituita da sensoristica meteorologica che deve necessariamente essere migliorata con riferimento particolare alla radiazione ed dalla caratterizzazione delle nubi, sia come indice di copertura che come tipologia.

Bibliografia

IBIMET, WMO, FAO, COST, 2005. *Workshop on climatic analysis and mapping for Agriculture (14-17 June 2005, Bologna, Italy)*.

10. Conclusioni

Il quadro delineato, per quanto parziale, mostra l'enorme mole delle attività in corso. Il settore della ricerca sul clima e sul cambiamento climatico appare vitale in quanto spinto da finanziamenti finalizzati in particolare agli studi sul tema del cambiamento climatico.

Da questo angolo di visuale la climatologia può apparire a prima vista un settore privilegiato in quanto è sotto i riflettori dei media e dell'opinione pubblica ed inoltre perché le ricerche condotte in tale ambito disciplinare sono state recentemente in grado di tradursi in decisioni operative (leggasi protocollo di Kyoto). Tuttavia non dev'essere a nostro giudizio trascurato il rischio che tale affermazione della materia si traduca paradossalmente in un impoverimento culturale per il settore. Tale rischio può tramutarsi in certezza se non viene tenuto presente che il sistema climatico è unico e non banalizzabile, in virtù di svariate peculiarità sottolineate nell'ambito di questa review e che qui di seguito riassumiamo brevemente:

- la variabile guida fondamentale del sistema climatico è il Sole, tant'è vero che, se spegnessimo il nostro astro, la circolazione atmosferica si spegnerebbe nel giro di pochi giorni;
- il sistema climatico è composto da atmosfera, oceani, terre emerse e ghiacci continentali ed oceanici, per cui le variabili in gioco sono migliaia ed interagiscono fra loro in modo molto complesso e secondo meccanismi che ci sono noti solo in piccola misura;
- il sistema climatico è in piedi per garantire il riequilibrio energetico globale del pianeta. Tale riequilibrio viene attuato per l'80% con la circolazione atmosferica e per il 20% con quella oceanica;
- il principale vettore dell'energia nel sistema atmosferico è il vapor d'acqua, il quale è anche il principale gas serra (il suo peso come gas serra è pari a circa 8 volte quello della CO₂).

Da tali premesse emerge che:

1. se si trascura o si sottovaluta il ruolo del Sole si smarrisce il legame strettissimo fra il clima ed il suo principale determinante;
2. se si trascura la circolazione è impossibile capire il comportamento (passato, attuale e futuro) del sistema climatico; in altre parole cercare di spiegare il clima senza considerare la circolazione atmosferica ed oceanica è come per un medico cercare di spiegare la fisiologia umana senza considerare la circolazione sanguigna;
3. trascurare il ruolo del vapor d'acqua è al pari irrealistico; se infatti il vapor d'acqua è il gorilla da 800 libbre dell'effetto serra, la CO₂ è la pastiglia ricostituente del gorilla, che spinge un po' più in alto le sue performance (il paragone, assai efficace, è tratto da un articolo divulgativo della Nasa).

Le sopraelencate considerazioni, che dovrebbero essere scontate per quanti si occupano di climatologia, vengono oggi sempre più spesso ignorate e dunque l'EPPUR SI MUOVE di Galileo dovrebbe essere "gridato" rispetto all'atmosfera, per rammentare a quanti lo trascurano il

fondamentale ruolo della circolazione nel sistema climatico.

Certamente il ruolo della circolazione sfugge del tutto a coloro (una marea vieppiù crescente) che oggi adottano in maniera del tutto acritica la cosiddetta teoria chimica, che vede i gas serra ed in particolare uno di loro (la CO₂) come chiave di lettura unica del sistema atmosferico e dei suoi comportamenti. Tale teoria segna purtroppo l'affermarsi di una visione riduzionistica, traducibile con il sillogismo "più anidride carbonica più energia e più temperatura", che è quanto di più lontano esista rispetto alla complessità del sistema. Un esempio pratico dei risultati dell'opera di banalizzazione frutto di tale moda si coglie con riferimento al settore della climatologia dinamica, branca della climatologia che vanta un'illustre tradizione che risale in Italia al professor Filippo Eredia, maestro di Fermi e fondatore del Servizio meteorologico dell'Aeronautica, e che al livello internazionale ha visto l'opera di scienziati come Thor Bergeron, Hubert Lamb e il nostro Michele Conte.

Climatologia dinamica significa lo studio della frequenza e persistenza dei diversi tipi di circolazione su un certo territorio (es: l'Italia o il Mediterraneo) e l'analisi degli effetti che tali tipi determinano al suolo (in termini di temperatura, nuvolosità, pioggia, vento, ecc.), per cui ad esempio con questo approccio è possibile, con riferimento agli anticloni o alle depressioni responsabili di fenomeni atmosferici cruciali come le siccità o le fasi di piovosità prolungata, evidenziare le tendenze in atto e sviluppare ipotesi sulle tendenze future, in modo da poter poi definire strategie di mitigazione in campo agricolo, forestale e di governo del territorio.

Negli anni più recenti le iniziative di ricerca in tale settore sono state purtroppo assai trascurate perché non ne viene più colta l'importanza e l'utilità, mentre basta

utilizzare le parole magiche "cambiamento climatico" e "CO₂" perché si aprano come per incanto le porte del finanziamento.

A nostro giudizio questo è un esempio di come la libertà di ricerca venga frenata in omaggio a mode che poco hanno a che vedere con una reale esigenza conoscitiva legata al nostro territorio. E si che sarebbe oggi imprescindibile che i climatologi si occupassero con molta più attenzione di quanto facciano oggi di questa benedetta circolazione, senza la quale non possiamo spiegare la gran parte dei fenomeni che fanno il tempo atmosferico sull'Italia (le gelate, le ondate di caldo, i temporali, i fronti, ecc.) e soprattutto non possiamo, partendo dagli studi sulla variabilità del clima, ricavare indicazioni circa gli effetti al suolo.

Altro tema su cui abbiamo particolarmente insistito in questa sede è quello dell'equilibrio fra modellistica da un lato e misure / sperimentazioni dall'altro. Tale tema diviene come in altri settori (es: settore agronomico) cruciale e su questo dovrà appuntarsi la nostra attenzione nei prossimi anni.

Concludiamo questa nostra fatica rammentando che il dubbio, oggi come ieri, deve continuare ad essere a fondamento di una ricerca scientifica libera da vincoli ideologici. La scienza, oggi come sempre, conduce a verità limitate e provvisorie, come mirabilmente fa dire Marguerite Yourcenar a Zenone, protopito di scienziato moderno e protagonista dell'indimenticabile Opera al nero: "So che non so quel che non so e invidio coloro che sapranno di più, ma so che anch'essi, come me, avranno da misurare, pesare, dedurre e diffidare delle deduzioni ottenute, stabilire nell'errore qual è la parte del vero e tener conto nel vero dell'eterna presenza di falso. Sono quasi riuscito a diffidare delle parole. Morirò un pò meno sciocco di come sono nato".